

# Trabajo Fin de Grado

## Grado en Ingeniería Aeroespacial

### Sistema de cambio semi-automático para un Formula Student

Autor: José Manuel Ríos Rueda

Tutor: José Ángel Acosta Rodríguez

**Departamento de Ingeniería de Sistemas y  
automática**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2017





Proyecto Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

# **Sistema de cambio semi-automático para un Formula Student**

Autor:

José Manuel Ríos Rueda

Tutor:

José Ángel Acosta Rodríguez

Profesor titular

Dep. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016





Proyecto Fin de Grado: Sistema de cambio semi-automático para un Formula Student

Autor: José Manuel Ríos Rueda

Tutor: José Ángel Acosta Rodríguez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2013

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A Gamero, Antonio Luis, Rodri,  
Manu Torres, Fernando  
Fernandez, Fran Matas, a mi  
tutor.*



# Agradecimientos

---

En primer lugar me gustaría hacer mención a mi familia, por estar siempre ahí y nunca haber perdido la confianza en mí durante todos estos años. Especialmente quiero hacer especial mención a mi madre, a la cual dedico este trabajo y le agradezco todo lo que ha hecho por mí durante todos estos años de formación, algo que nunca le podré devolver.

Agradecer también a mis compañeros de clase que compartieron pupitre conmigo desde el primer día de carrera hasta el último y junto a los que cooperé para hacer más fácil, amena e inolvidable esta etapa de mi vida. Ellos son: Rodrigo Ruiz y Francisco Matas.

En general a TODO el equipo Arus de la Universidad de Sevilla, que además de los ya mencionados me gustaría hacer especial mención a Fernando Osuna, Manuel Girona, Ignacio Romero, Cristina Silvestre, José Manuel Sánchez, Eva Oya, Miguel Ángel Gilabert, Daniel Gómez y Enrique Romero los cuales considero unos enormes compañeros de trabajo sin los cuales nunca habiéramos llegado a producir 3 monoplazas además de amigos. De ellos es imposible no destacar la enorme fuerza de voluntad y la perseverancia demostrada para llevar a cabo cualquier proyecto.

*José Manuel Ríos Rueda*

*Sevilla, 2017*



# Resumen

---

Este trabajo describe un sistema que permite que una caja de transmisión manual de motocicleta funcione como una caja de transmisión secuencial semi-automática, todo ello con el propósito de que el motor sea montado en un monoplaza de carreras, concretamente en un Formula Student.

Este sistema se basará en dos actuadores puramente eléctricos que sustituirán las acciones que el piloto de la motocicleta haría para realizar un cambio de marcha. Estos actuadores serán controlados por el piloto desde el volante del monoplaza de forma indirecta debido a que todo el sistema se coordina y controla para que funcione eficientemente desde una PCB, la cual también es diseñada en su totalidad en este trabajo.

Todo el diseño está enmarcado dentro de un contexto en el que cobra gran importancia el factor económico y la futura fabricación del sistema, así como que no solamente se busca que el mecanismo funcione correctamente, sino que además debe funcionar de forma eficiente y potenciar al máximo el rendimiento del monoplaza.







# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Selección de los actuadores</b>	<b>3</b>
<i>Simulación del proceso de embrague</i>	6
<b>3 Adaptación del actuador del embrague</b>	<b>11</b>
3.1 <i>Transmisión de la potencia</i>	11
3.2 <i>Bloqueo del giro y sujeción del actuador</i>	13
3.3 <i>Sensor de posición</i>	15
3.4 <i>Conexiónado eléctrico</i>	19
<b>4 Diseño de leva</b>	<b>21</b>
4.1 <i>Funcionalidad y localización</i>	21
4.2 <i>Leva del embrague</i>	22
4.2.1 <i>Muelle de torsión</i>	25
4.2.2 <i>Diseño final</i>	29
4.3 <i>Volante completo y conexiónado eléctrico</i>	30
<b>5 Controlador</b>	<b>31</b>
5.4 <i>Funcionalidad</i>	31
5.4.1 <i>Coordinación</i>	34
5.5 <i>PCB</i>	36
5.5.1 <i>Entradas</i>	38
5.5.2 <i>Salidas</i>	39
5.5.3 <i>PCB final</i>	45
5.6 <i>Programación del microcontrolador</i>	52
5.6.1 <i>Algoritmo</i>	53
5.6.2 <i>Métodos de seguridad software</i>	57
5.6.3 <i>Nociones sobre la puesta a punto</i>	58
<b>6 Conclusiones y balance</b>	<b>61</b>
<b>Referencias</b>	<b>64</b>
<b>Índice de Términos</b>	<b>66</b>
<b>Anexos</b>	<b>68</b>
<i>Anexo 1: Datasheet BOSCH 0 390 201 944</i>	69
<i>Anexo 2: Actuador del embrague</i>	71
<i>Actuador completo</i>	71
<i>Lifter Lever</i>	72
<i>Sensor de posición</i>	73
<i>Cogida actuador</i>	75
<i>Anexo 3: Datasheet potenciómetro Alps RK09D113000F</i>	77
<i>Anexo 4: Plástico ABS</i>	80

<i>Anexo 5: Leva embrague</i>	81
Anexo 5.1: Leva embrague completo	81
Anexo 5.2: Soporte leva	82
Anexo 5.3: Brazo leva	83
Anexo 5.4: Tapadera inferior	84
<i>Anexo 6: Datasheet plástico PLA 3d850</i>	85
<i>Anexo 7: Muelle a torsion</i>	87
<i>Anexo 8: Ejemplo de código</i>	89
<i>Anexo 9: Código de simulación del proceso de embrague</i>	94
Anexo 9.1: Código principal	94
Anexo 9.2: Función adicional: Torque	95
Anexo 9.3: Función adicional: SE2	96
<i>Anexo 10: Datasheet conector REAN RT3DC-B</i>	97
<i>Anexo 11: Planos PCB</i>	99
Anexo 11.1: Capa superior	99
Anexo 11.2: Capa VCC	100
Anexo 11.3: Capa GND	101
Anexo 11.4: Capa inferior	102
<i>Anexo 12: Diagrama de flujo completo</i>	103

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2.1 Comparativa de actuadores para el embrague	5
Tabla 4.1 Formulas para el cálculo de un muelle a torsión	27
Tabla 4.2 Dimensiones del muelle	28
Tabla 5.1 Características principales del ATmega 328P	37
Tabla 5.2 Casuística de los pines del microcontrolador	43



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1 Maneta del embrague y pedal de cambio (respectivamente)	2
Figura 1.2 Lifter lever y gearshift arm (respectivamente)	2
Figura 2.1 Esquema del ensayo realizado para calcular la fuerza necesaria para embragar.	
Lifter Lever visto desde arriba	3
Figura 2.2 Actuador del embrague	5
Figura 2.3 Kit del actuador del cambio	6
Figura 2.4 Actuador del Cambio ensamblado	6
Figura 2.5 Curvas características del BOSCH 0 390 201 944	7
Figura 2.6 Esquema del funcionamiento del embrague mecánico	7
Figura 2.7 Lifter Piece	7
Figura 2.8 Lifter lever fuera del motor para observar en detalle el mecanizado de su parte inferior	7
Figura 2.9 Embrague en proceso de desmontaje. Se observan muelles, lifter plate, discos de embrague, etc	7
Figura 2.10 Gráfica velocidad de giro//tiempo	9
Figura 2.11 Gráfica posición angular/tiempo	9
Figura 2.12 Gráfica par/tiempo	10
Figura 3.1 Esquema del montaje del embrague	12
Figura 3.2 Lifter lever mecanizado y ensamblado	12
Figura 3.3 Tensiones de von Mises	13
Figura 3.4 Desplazamientos	13
Figura 3.5 Adaptador. Diseño final	13
Figura 3.6 Prediseño o versión 1.0 de la cogida del actuador	13
Figura 3.7 Capturas de los ensayos estructurales de las cogidas. A la izquierda la versión 1.0 y a la derecha la v1.4	14
Figura 3.8 Versión 1.4 de la cogida de actuador	15
Figura 3.9 Cogida fabricada artesanalmente	15
Figura 3.10 Potenciómetro del actuador	16
Figura 3.11 Assembly del sensor de posición (prediseño)	17
Figura 3.12 Assembly del sensor de posición (versión final)	17
Figura 3.13 Modelo 3d del actuador	17
Figura 3.14 Renderizado del actuador	18
Figura 3.15 Renderizado 2 del actuador	18
Figura 3.16 Ilustración gráfica del montaje del actuador	18
Figura 3.17 Esquema eléctrico para los actuadores	19

Figura 3.18 Captura del datasheet del Quickshifter donde se explica su conexionado eléctrico	20
Figura 4.1 vista del volante con indicaciones	22
Figura 4.2 superficie disponible para la leva del embrague	23
Figura 4.3 Proceso de diseño de la sección principal de la leva	23
Figura 4.4 Imagen del potenciómetro Alps RK09D113000F para la leva del embrague	24
Figura 4.5 Sección principal de la carcasa de la leva del embrague	24
Figura 4.6 Sección principal de la leva del embrague	24
Figura 4.7 Carcasa de la leva del embrague versión 0.4	25
Figura 4.8 Brazo de la leva del embrague versión 0.4	25
Figura 4.9 Proyección de la planta de la leva del embrague sobre la superficie disponible	25
Figura 4.10 Esquema del tipo de arrollamiento seleccionado	26
Figura 4.11 Estimación de la precarga que tendrá el muelle	26
Figura 4.12 Esquema de como será aplicada la fuerza en la leva	27
Figura 4.13 Evolución del coeficiente de Wahl en función de la Curvatura	27
Figura 4.14 Ángulos del muelle	28
Figura 4.15 Esquema del muelle bajo diferentes estados de carga	28
Figura 4.16 Modelo definitivo para el soporte de la leva	29
Figura 4.17 Modelo definitivo para el brazo de la leva	29
Figura 4.18 Esquema del montaje de la leva del embrague	30
Figura 4.19 Leva embrague montada en el volante	30
Figura 4.20 Renderizado del volante completo	30
Figura 4.21 Fotografía del volante una vez fabricado y montado	31
Figura 4.22 Esquema eléctrico del volante	31
Figura 5.1 Esquema eléctrico general del sistema del cambio	32
Figura 5.2 Diagrama de bloques del control del embrague	33
Figura 5.3 Diagrama de control completo	34
Figura 5.4 Cronograma genérico de la operación de subida	35
Figura 5.5 Cronograma genérico operación de bajada.	36
Figura 5.6 Fotografía del ATmega 328P	37
Figura 5.7 Modelado de la señal de microcontrolador en PSPICE	39
Figura 5.8 Simulación 10s de un pulso rectangular generado por el modelo del microcontrolador en PSPICE	39
Figura 5.9 Esquema de la celdilla básica 5V-12V	40
Figura 5.10 Evolución de la tensión en dos puntos críticos en una simulación de 10s de la celdilla básica	40
Figura 5.11 Evolución de la intensidad en dos puntos críticos de la simulación de la figura 5.9	41
Figura 5.12 Transitorio de apertura de la celdilla básica de la simulación de la figura 5.9	41
Figura 5.13 Puente H para el control del actuador del embrague	42
Figura 5.14 Tensiones resultantes de la simulación de la figura 5.13	43

Figura 5.15 Intensidad resultante de la simulación de la figura 5.13	43
Figura 5.16 Voltajes en el comienzo de giro en el sentido 1	44
Figura 5.17 Fotografía durante el montaje de un prototipo	45
Figura 5.18 Parte del esquemático de la PCB: microcontrolador y conectores de comunicación	45
Figura 5.19 Parte del esquemático de la PCB: Salidas, fusibles y sensor de intensidad	46
Figura 5.20 Conversor de 12V a 5V	46
Figura 5.21 Parte del esquemático de la PCB: Ferritas y entradas	46
Figura 5.22 Capas superior e inferior del la PCB	49
Figura 5.23 Capa VCC de la PCB	50
Figura 5.24 Capa GND de la PCB	50
Figura 5.25 Detalle de la parte superior de la PCB	50
Figura 5.26 Detalle de la parte inferior de la PCB	51
Figura 5.27 PCB de control de potencia eléctrica y del sistema de cambio	52
Figura 5.28 Diagrama de flujo del control del bucle principal o de seguimiento de leva	53
Figura 5.29 Diagrama de flujo del control de la operación de subida	54
Figura 5.30 Diagrama de flujo del control de la operación de bajada	55
Figura 5.31 Intervalos de variación de la medida de la posición del embrague	56
Figura 5.32 Puesta a punto del sistema del cambio antes de que sea montado en el motor	58
Figura 5.33 Captura del actuador del embrague embragando	59
Figura 5.34 Representación en una pantalla del valor obtenido del conversor A/D a partir de la señal analógica del sensor de posición del embrague.	59
Figura 5.35 ART-17 durante una jornada de tests	60







# 1 INTRODUCCIÓN

---

El objetivo de este proyecto es la implementación de un sistema de cambio semi-automático en un Fórmula Student, más específicamente en el monoplaza del equipo Arus de la Universidad de Sevilla durante la temporada 2015/2016 denominado ART-16, el cual usa el motor originario de una motocicleta Honda CBR600 RR del año 2006. Esto se conseguirá mediante el empleo de actuadores que sustituirán las acciones que el piloto de la motocicleta debería hacer para realizar la subida o la bajada de marcha. El motor HONDA viene equipado de serie con un cambio manual y una **caja de cambios secuencial**<sup>1</sup>.

Estas acciones están claramente diferenciadas y se pueden identificar fácilmente en un proceso de cambio normal<sup>2</sup>:

1. Con el motor trabajando en las condiciones de carga y revoluciones adecuadas nos disponemos a realizar el cambio, por ejemplo, una subida de marcha. Este proceso comienza con la acción de embragar, realizada a través de la maneta izquierda del piloto la cual está conectada mediante el cable de embrague (“*clutch cable*”) a la leva de embrague (“*lifter lever*”) del motor situada a la derecha del mismo [1].
2. El siguiente paso consiste, para el caso del ejemplo, en efectuar la subida de marcha propiamente dicha. Este cambio se realiza empujando hacia arriba (hacia abajo en el caso de que se desee bajar) con el pie izquierdo el pedal de cambio situado en la parte izquierda del motor, el cual está conectado al brazo del cambio del motor “*gearshift arm*” [1].
3. Una vez metida la nueva velocidad se desembraga soltando la maneta del embrague y se da por finalizado el cambio.

Una vez descrito el proceso a automatizar **hay que dejar de lado los elementos auxiliares** (figura 1.1) que asisten al piloto de la moto en la maniobra del cambio (pedal y maneta) y centrarse directamente en las salidas del bloque motor para dicha operación: ***gearshift arm* y *lifter lever***, los cuales se pueden ver en la figura 1.2.

Otro punto a tener cuenta es que **las actuaciones sobre estos elementos son** bastantes diferentes. Sobre el *lifter lever* es necesario actuar de forma controlada y poder **efectuar actuaciones a punto**, es decir, tener la capacidad de mantener el embrague en una determinada posición. Por otra parte, sobre el *gearshift arm* se debe aplicar una fuerza impulsiva a modo de impacto.

---

<sup>1</sup> Cambio secuencial: Cada toque sobre la palanca o pulsación sobre un botón engrana la marcha superior o inferior [9].

<sup>2</sup> Además del cambio de marcha con el vehículo en movimiento también es necesario tener en cuenta también la puesta en movimiento del vehículo desde parado, en la cual es necesario desembragar paulatinamente hasta que el vehículo alcance una cierta velocidad.



Figura 1.1 Maneta de embrague y pedal de cambio (respectivamente)

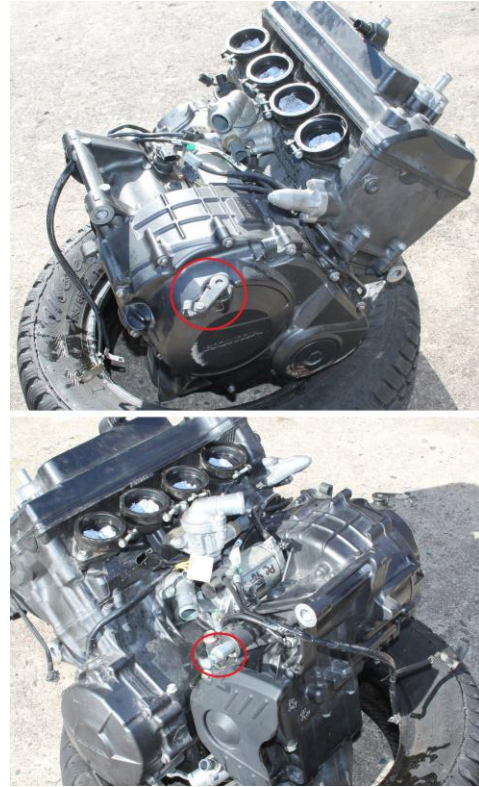


Figura 1.2 *Lifter lever* y *gearshift arm* (respectivamente)

Por lo tanto, se deduce directamente de aquí que serán imprescindibles **dos actuadores**: uno para efectuar **el cambio de marcha** y otro para **controlar el embrague**. Así mismo ambos actuadores deberán trabajar de forma coordinada y sincronizada, por lo que también se hace necesaria una **unidad de control** que realice esta tarea. Lógicamente, esta unidad de control recibirá las **órdenes del piloto** ya que el sistema será del tipo **semi-automático**, no completamente automático.

En esta introducción se han deducido las principales partes del sistema y por tanto de la memoria, las cuales se pueden recapitular en:

- Dos actuadores, una para el proceso de subir o bajar marcha y otro para embragar.
- Elementos desde los cuales el piloto dará las órdenes pertinentes al controlador.
- Un controlador que coordine todo el sistema.

## 2 SELECCIÓN DE LOS ACTUADORES

En este punto se abordará la elección de ambos actuadores. Esta elección tiene una gran importancia puesto que en función del tipo de actuador que sea seleccionado todo el proyecto quedará condicionado de una forma u otra.

Se tratará en primer lugar la automatización del embrague. El primer paso es obtener un orden de magnitud de la fuerza necesaria para comprimir los muelles del embrague, es decir, para embragar. Esta se puede obtener en un simple ensayo.

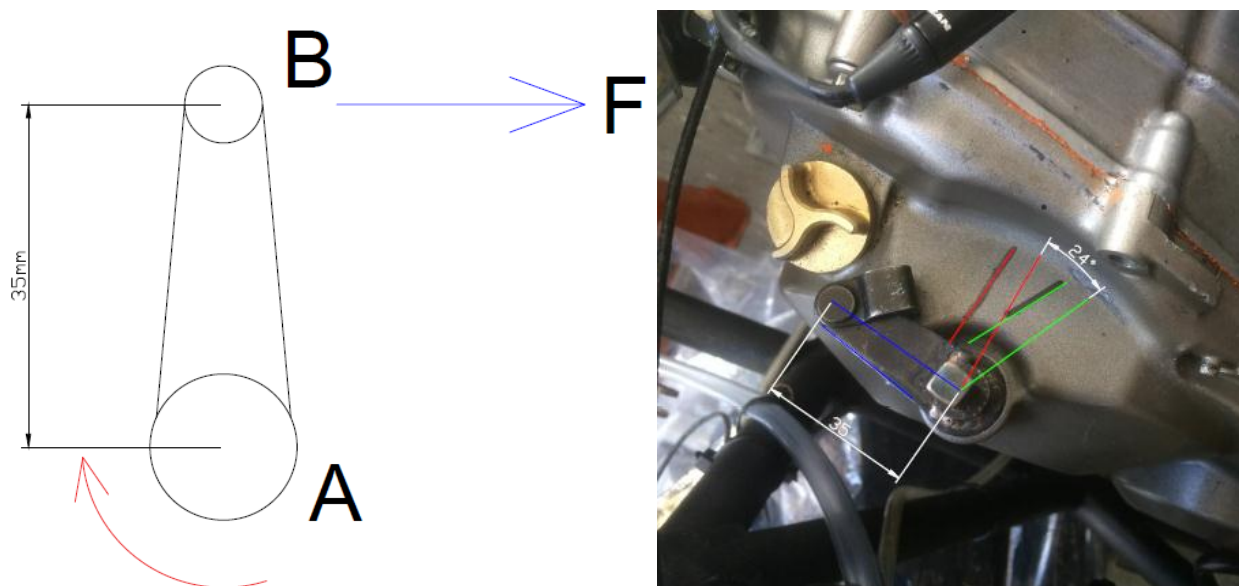


Figura 2.1 Esquema del ensayo realizado para calcular la fuerza necesaria para embragar. *Lifter lever* visto desde arriba.

En la figura 2.1 se puede ver un pequeño esquema de dicho ensayo, en el cual está representado el *lifter lever* visto desde arriba con la dirección de movimiento en rojo y la dirección de la fuerza en azul. El punto “A” representa la parte fija del *lifter lever*, la cual está conectada a través de su eje al *lifter piece* y el punto “B” la parte móvil y donde originariamente iba conectado el cable de embrague [1]. El ensayo consistió en colocar un dinamómetro en el punto “B” para cuantificar la fuerza y marcar sobre el mismo motor las posiciones en las que se encuentra embragado, desembragado y el límite del mecanismo. Los resultados obtenidos no son demasiado exactos pero suficientes para obtener una primera estimación:

- Fuerza necesaria ~ **20-23kg**
- Recorrido desde el punto donde se comienza a embragar hasta el punto de embrague máximo ~ **20°**
- Recorrido desde el punto donde se comienza a embragar hasta el límite del mecanismo ~ **24°**

Según la ecuación 2.1 se puede ver que el par que es necesario aplicar en el eje debe ser superior a **7.897 Nm** (ya que la longitud del brazo o la distancia entre A y B es de **35mm**) y que el embrague tiene un margen de aproximadamente unos **4°** (diferencia entre el recorrido del mecanismo y el recorrido en el que se considera que el motor está embragado). Si se **impone** además que el cambio se realice en un tiempo inferior a **200ms** para que el sistema suponga una reducción superior al 50% del tiempo invertido en el cambio respecto el tiempo que se emplearía en un cambio manual (este se estima en unas condiciones óptimas en 0.5 segundos) se obtiene una potencia de:

$$T = F \times d = 22.5kg \times 35mm \approx 7.897Nm \quad (2.1)$$

$$P = T \times \omega \rightarrow 7.897Nm \times \frac{20^\circ \times \pi}{180 \times 0.2s} = 13.78 W \quad (2.2)$$

Según la ecuación 2.2 la potencia del actuador del embrague debe ser superior **13.78 W**, donde “T” es el par ejercido por el actuador y “ω” la velocidad angular. En este cálculo se ha supuesto que el retorno lo efectúan los propios muelles de escape y que este tiempo de retorno es despreciable. Debido a ello este cálculo no tiene demasiada precisión pero sí es útil para obtener un orden de magnitud de los requisitos que debe cumplir el actuador.

El siguiente paso es hacer un estudio de los diferentes tipos de actuadores que hay en el mercado en función de estas necesidades. Para este tipo de aplicación se pueden clasificar los actuadores en 3 grandes grupos: **eléctricos, hidráulicos y neumáticos**. En el caso del proceso de embragar se descartó el empleo de un sistema neumático debido al tamaño del depósito (de aire comprimido) que se requeriría para mantener un par de 8Nm durante el tiempo que el piloto estime necesario.

En el supuesto de **actuadores eléctricos** existen dos principales variantes **lineales y rotativos**. En el caso de lineales por su parte existe una gran variedad y además su instalación, a priori, parecería relativamente sencilla ya que sería bastante similar al funcionamiento con cable. Su principal desventaja es que estos actuadores no son más que un motor de DC (rotativo) con una reductora y un mecanismo que transfiere el movimiento de rotativo a lineal, por lo que es un peso y un coste adicional que se podrían ahorrar usando directamente un actuador rotativo. Otra desventaja es que para conseguir uno que tenga una velocidad de actuación suficiente para esta aplicación el precio se eleva notablemente. En el otro caso existe un enorme abanico de tipos motores de continua y de diferentes configuraciones: motores paso a paso, servomotores, *brushless*, *brush*... Por último están los **actuadores hidráulicos**, que tienen unas prestaciones (velocidad de actuación y fuerza) difícilmente alcanzables por uno eléctrico, pero a cambio de un elevado coste y generalmente un incremento sustancial de peso. Estas características expuestas aquí se encuentran esquematizadas en la tabla 2.1, donde cabe remarcar que todas ellas **están referenciadas a este tipo de aplicación y a un determinado presupuesto**, es decir, en función del tipo aplicación, un mismo peso puede considerarse elevado o bajo. Por otra parte aumentando el presupuesto, generalmente siempre se consiguen mejores prestaciones en cualquier categoría. Particularmente cuando se habla de coste en la tabla 2.1 se refiere **al coste medio que tendría un actuador de dicho tipo que cumpla los requisitos**.

Tras un exhaustivo estudio del mercado el motor seleccionado fue el motor DC convertible **BOSCH 0 390 201 944** originario del techo panorámico del BMW M3 e46, el cual puede observarse en la figura 2.2. Las principales ventajas de este motor son principalmente **el precio y el peso**, ya que al ser un elemento de un modelo de coche comercial está bastante extendido (por tanto fácil de adquirir) y tiene un precio inferior a los 50€. Su peso ronda los **450 gramos**. Otra de sus ventajas es que tiene la capacidad de **mantener una determinada posición sin necesidad de estar suministrándole corriente eléctrica**, lo que facilitará el control y disminuirá el consumo eléctrico del sistema.

Por otra parte al ser un motor DC básico, del tipo *brushless*, el algoritmo de control que deberá seguir el controlador para realizar actuaciones a punto deberá cumplir una serie de requisitos específicos y será totalmente diferente al que se emplearía con un servomotor o un paso a paso. Para más información se puede consultar el anexo 1 donde se encuentra adjunto su *datasheet*.

Tipo	Peso	Coste	Consumo eléctrico	Precisión en la operación (velocidad/fuerza)
Neumáticos	N/A	N/A	N/A	N/A
Eléctricos (lineal)	Medio 0.7-1.2 kg	Medio 300-600€	Alto	Alta
Eléctricos (rotativos)	Bajo <0.6kg	Variable	Alto	Variable
Hidráulicos	Alto 1-1.5kg	Alto 600-1200€	Bajo	Alta

Tabla 2.1 Comparativa de actuadores para el embrague



Figura 2.2 Actuador de embrague

Para el proceso del cambio de marchas se debe repetir el mismo proceso, puesto que, como se dijo anteriormente el tipo de actuación es totalmente diferente. Para este caso se han contemplado actuadores **neumáticos y eléctricos**. Los neumáticos tienen la principal ventaja de que la fuerza de actuación puede ser regulada ajustando el caudal de descarga y además el consumo eléctrico es mínimo. En contra, la principal desventaja es que se necesita dimensionar el tamaño del depósito con bastante precisión, lo cual supone un riesgo añadido. Por su parte los eléctricos suelen ser más pesados y no permiten regulación alguna de la fuerza, pero en cambio existen *kits* comerciales preparados para esta aplicación y para ser montados directamente en la motocicleta. Estos modelos comerciales son usados por personas con algún tipo de minusvalía o en aplicaciones de este tipo. El seleccionado fue el *kit Quickshifter* del fabricante **Flatshifter**.

Como se puede observar en la figura 2.3 el *kit* viene con su propio controlador, el cual consiste en una etapa de potencia y de control necesarios para su correcto funcionamiento, lo que le permite ser un sistema prácticamente independiente del resto de la motocicleta, a excepción del suministro eléctrico.





Figura 2.3 Kit del actuador del cambio



Figura 2.4 Actuador del cambio ensamblado

Para su correcto ensamblaje y conexión eléctrico se sigue la información dada por el fabricante en su *datasheet* [2]. Los datos más importantes obtenidos de este son que durante el montaje el *gearshift arm* debe colocarse en un **ángulo de 90°** con el actuador y que la fuerza del actuador tiene que ser aplicada a una distancia de **110 mm** del eje de rotación del *gearshift arm*. La sujeción del actuador se realizará con una **cogida soldada al propio chasis** del monoplaza mientras que el extremo del émbolo (parte móvil) **se acoplará al *gearshift arm***. Por otra parte el controlador deberá conectarse correctamente e irá fijado en el interior del *cockpit* mediante velcro al suelo del mismo. El diseño de la cogida del chasis y la mecanización del *gearshift arm* no son objeto de este trabajo ya que su fabricación se realiza manualmente en función de estas necesidades cuando todo el entorno está acoplado, a modo “ensayo y error”, puesto que es necesario ser especialmente preciso en el emplazamiento<sup>3</sup>. Recordar que el objetivo de este sistema no es ser producido en cadena sino ser implementado en el monoplaza ART-16. El resultado del ensamblaje definitivo se observa en la figura 2.4.

## Simulación del proceso de embrague

El objetivo de esta última parte del capítulo es realizar una estimación más realista de que resultados se obtendrían con el actuador seleccionado para darle el sí definitivo. Para ello se ha recurrido al *software* MATLAB [7] donde se realizará una simulación de un proceso de embragar.

Para modelar el actuador en MATLAB serán empleadas sus curvas características proporcionadas por el fabricante (figura 2.5 o anexo 1) de las cuales es especialmente útil la curva **par-revoluciones**.

Para realizar la simulación es necesario modelar la **par o fuerza resistente**, que está relacionado directamente con los muelles de embrague. Atendiendo al esquema de la figura 2.6 se puede comprender el funcionamiento mecánico del embrague del motor Honda [1]: al girar, el *lifter lever* arrastra con él (gracias al mecanizado de su parte inferior) al *lifter piece* que está en contacto con el *lifter plate* donde apoyan los muelles que, debido a este movimiento, se comprimen. Por tanto se deja de aplicar presión sobre los discos de embrague produciéndose el desacople de la caja de transmisión con el cigüeñal [1]. A diferencia de la figura 2.6 hay 5 muelles, los cuales es necesario modelar. Mediante geometría se puede obtener aproximadamente la relación de la longitud que estos se comprimen con el giro ángulo girado por *lifer lever* (ecuación 2.1).

<sup>3</sup> En este caso existe un condicionante más debido a que la zona izquierda del motor (desde el punto de vista del piloto) queda bastante saturada debido a que es ocupada por elementos como: piñón de salida, corona, palier izquierdo, conductos para el sistema de refrigeración.



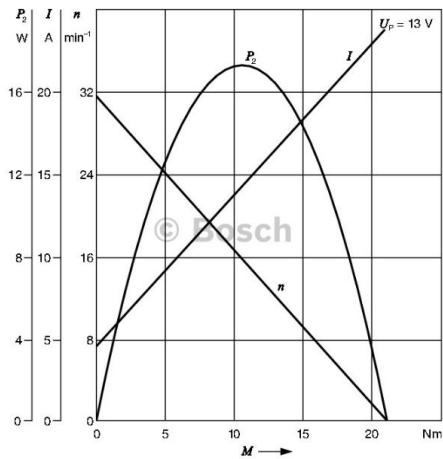


Figura 2.5 Curvas características del motor BOSCH 0 390 201 944



Figura 2.8 Lifter lever fuera del motor para observar en detalle el mecanizado de su parte inferior

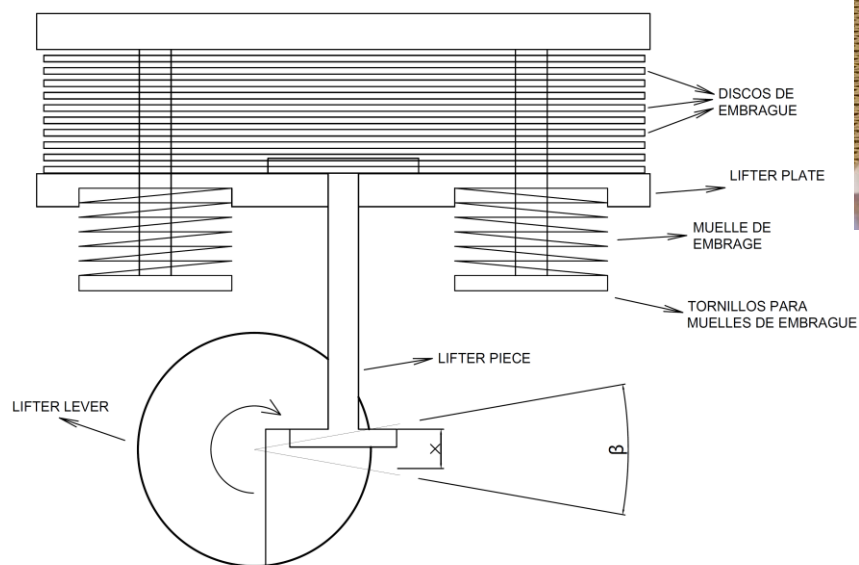


Figura 2.6 Esquema del funcionamiento del embrague mecánico



Figura 2.7 Lifter piece

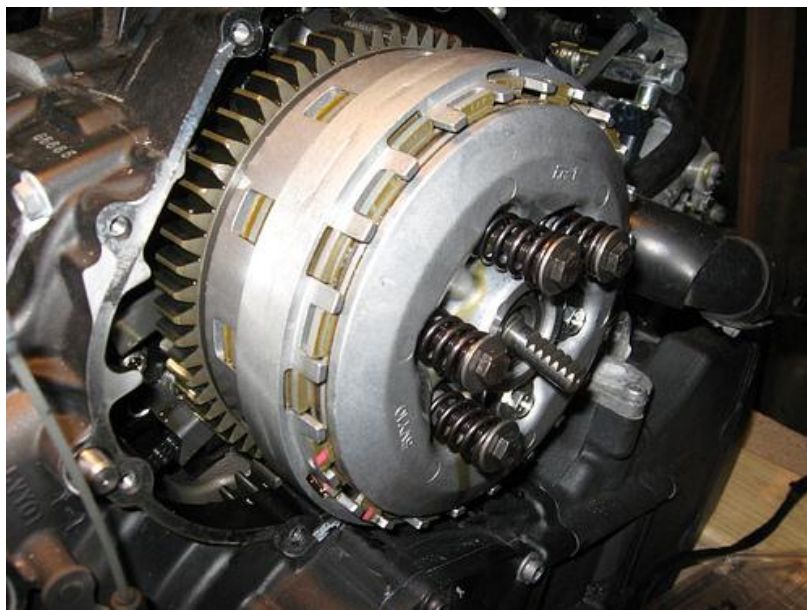


Figura 2.9 Embrague en proceso de desmontaje. Se observan muelles, lifter plate, discos de embrague, etc

Se deduce de este análisis que la fuerza resistente que debe vencer el actuador no es más que la fuerza elástica que se produce de comprimir los muelles para separar los discos de embrague (tener en cuenta que se están despreciando fuerzas de rozamiento y la influencia que tendrá el giro del embrague en el par resistente). Para resolver este problema es necesario reducirlo a cualquiera de las partes del mecanismo que lo integra, en este caso será el *lifter lever*. Por tanto, si se denomina  $\beta$  al **ángulo girado por el lifter lever** desde la posición de reposo,  $x$  al **desplazamiento del lifter piece** a lo largo de su eje,  $F_{ELAS}$  a la fuerza elástica generada por **un muelle** y  $T_{ELAS}$  al par generado por los **muelles en el lifter lever**, se obtiene que:

$$x = 2R * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \approx R * \sin(\beta) \quad (2.1)$$

$$T_{ELAS} = 5 * F_{ELAS} * R \quad (2.2)$$

Mediante el empleo de las ecuaciones (2.1) y (2.2) se puede reducir el mecanismo al *lifter lever*. Para su obtención **se han realizado simplificaciones** basadas en la suposición del que el ángulo  $\beta$  será siempre muy inferior a 1 y que el contacto entre el *lifter piece* y el *lifter lever* siempre se realiza en el más alejado del eje central del mecanizado de este (por tanto la distancia al eje es el radio “**R**” del *lifter lever*, 6mm).

Para modelar la fuerza elástica se resolverá un sistema de ecuaciones generado de los datos obtenidos del potenciómetro y los ángulos correspondientes a cada uno valores (en este caso serán el ángulo en el que se empieza a embragar y el del final de recorrido, es decir, el inicial y el final). Para el cálculo de la fuerza elástica se empleará la ecuación de la fuerza elástica para un cuerpo elástico con una **constante elástica  $K_{ELAS}$**  (ecuación 2.3), la cual será una de las incógnitas del sistema. La otra incógnita del sistema de ecuaciones no lineal será la precarga que adquieren los muelles al ser montados ( $L_{PRE}$ ). La longitud inicial de los muelles de embrague se supone de 45.2mm ( $L_0$ ). Por tanto el sistema de ecuaciones queda (ecuación 2.4):

$$F_{ELAS} = K_{ELAS} * (\Delta x) \quad (2.3)$$

$$\begin{cases} F_{dinamo}(\beta = 0) * d = T_{ELAS}(\beta = 0) \\ F_{dinamo}(\beta = 24) * d = T_{ELAS}(\beta = 24) \end{cases} \quad (2.4)$$

$$F_{ELAS}(\beta = 0) = 5 * K_{ELAS} * (L_0 - L_{PRE}) \quad (2.5)$$

$$F_{ELAS}(\beta = 24) = 5 * K_{ELAS} * (L_0 - L_{PRE} + x(\beta = 24)) \quad (2.6)$$

Los valores del dinamómetro para  $\beta$  igual a  $0^\circ$  y  $24^\circ$  son 20 kg y 23 kg respectivamente. Recordar que esta fuerza es medida a una distancia “d” del eje del potenciómetro de 35mm. Por otra parte para el cálculo de “x” y el par elástico “ $T_{ELAS}$ ” se emplean las ecuaciones (2.1) y (2.2)

. El resultado del sistema de ecuaciones es:  **$L_{PRE} = 28.9$  mm y  $K_{ELAS} = 14069$  N/m.**

Una vez modelada la fuerza elástica resistente se puede dar paso a realizar la simulación del sistema completo. En la simulación se partirá del embrague en la posición de reposo y en dicha posición el actuador comenzará a embragar hasta alcanzar la posición final del mecanismo. Como ya se ha mencionado el mecanismo será reducido al *lifter lever* y **se supondrá un momento de inercia equivalente (según el eje del mismo) de  $0.005$  kg·m<sup>2</sup>**, se puede comprobar este no será superior a esta cifra. Con estos datos puede dar comienzo la simulación. Para realizara se implementará en MATLAB un **problema iterativo** con intervalo de tiempo entre iteración e iteración de **0.1 ms**. Las ecuaciones que intervienen en el problema son [3]:

$$M = \frac{dL}{dt} \quad \text{Ecuación de la dinámica de rotación} \quad (2.7)$$

$$L = I * \omega \quad \text{Ecuación momento angular para sólido rígido rotando alrededor de un eje} \quad (2.8)$$

$$\omega = \omega_0 + p * \Delta t \quad \text{Ecuación cinemática del movimiento rotativo uniformemente acelerado} \quad (2.9)$$

Donde “M” es el **par resultante** del sistema, “L” el **momento angular resultante** del sistema, “I” el **momento de inercia** del sistema, “ $\omega$ ” la **velocidad de giro** del sistema y “p” la **aceleración angular** del sistema.

Con las ecuaciones (2.7), (2.8) y (2.9) se puede plantear el problema iterativo mostrado a continuación y que programado correctamente en el *software* MATLAB proporcionará los resultados de la simulación:

$$x_k = R * \sin(\beta_k) \quad (2.10)$$

$$F_{ELAS_k} = 5 * K_{ELAS} * (L_0 - L_{PRE} + x_k) \quad (2.11)$$

$$T_{ELAS_k} = F_{ELAS_k} * R \quad (2.12)$$

$$M_{RESULT_k} = T_{ACT}(\beta_k) - T_{ELAS_k} \quad (2.13)$$

$$\rho_k = M_{RESULT_k} / I \quad (2.14)$$

$$\omega_{k+1} = \omega_k + \rho_k * \Delta t \quad (2.15)$$

$$\beta_{k+1} = \beta_k + \omega_{k+1} * \Delta t \quad (2.16)$$

$$k = k + 1 \quad (2.17)$$

El código programado se puede consultar en el anexo 9 y a continuación se observan de forma gráfica los principales resultados obtenidos de la simulación en las figuras 2.10, 2.11 y 2.12.

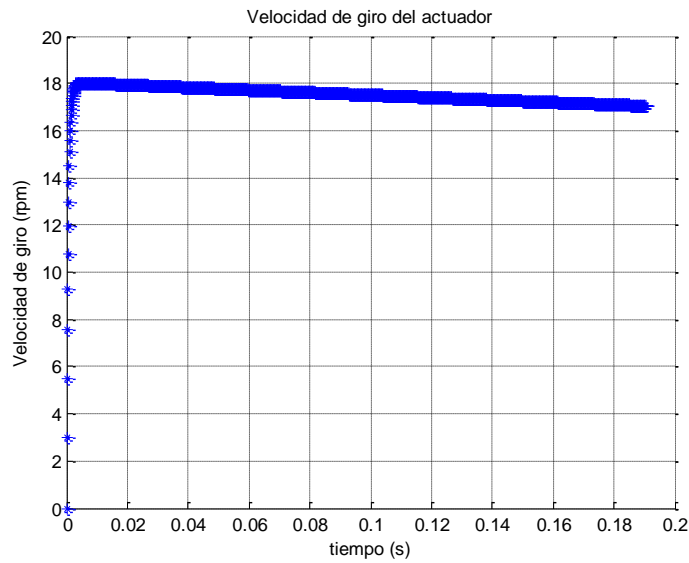


Figura 2.10 Gráfica velocidad de giro / tiempo

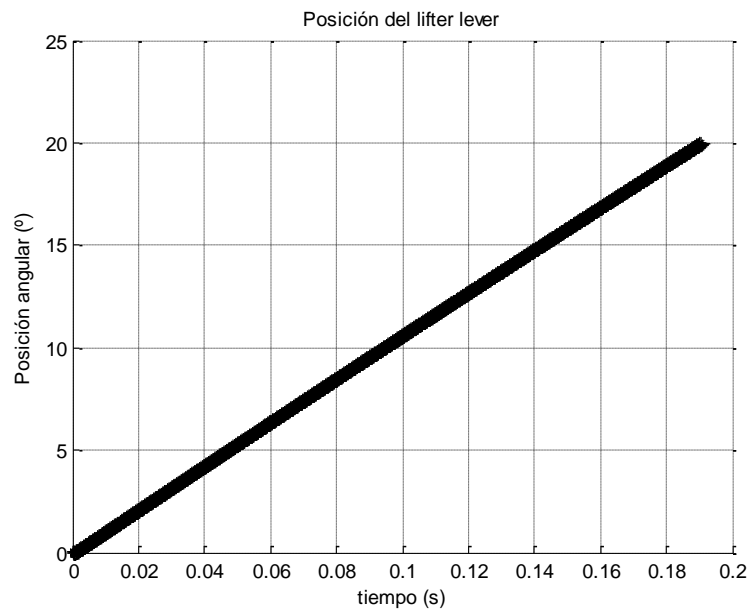


Figura 2.11 Gráfica posición angular / tiempo

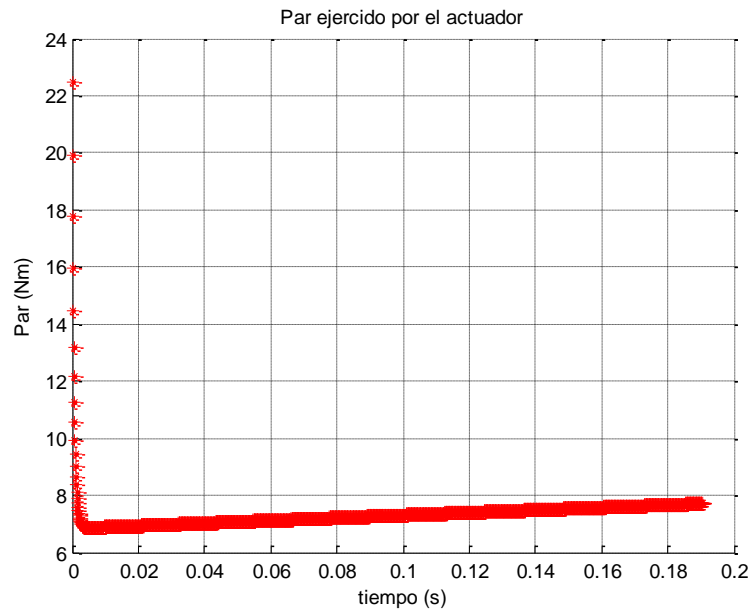


Figura 2.12 Gráfica par/tiempo

Como se puede observar el tiempo que predice la simulación que tardará en girar **el lifter lever 20° serán 190 ms**. Durante este proceso ejercerá un par medio de 7.35 Nm, dándose el máximo en el momento del arranque lógicamente y un mínimo cuando alcanza movimiento “quasiestacionario” (ya que la fuerza elástica continua incrementando) de 6,88 Nm. Por otra parte la se obtiene una velocidad de giro media de 17.51 rpm y una velocidad de giro máxima de 18.04 rpm en el momento que se alcanza el movimiento “quasiestacionario” (en el mismo punto donde la fuerza es mínima, como era de esperar). Con estos datos se podrían realizar simulaciones para obtener el consumo de corriente y de potencia eléctrica del actuador usando el resto de curvas características del mismo.

A la vista de los resultados se da por válido el actuador aunque habrá que tener en cuenta que el margen por el que este se decanta como válido está bastante ajustado.

## 3 ADAPTACIÓN DEL ACTUADOR DEL EMBRAGUE

---

En este punto se abordará la adaptación del actuador (motor DC Bosch 0 390 201 944). Esta adaptación se compondrá de la transmisión del giro del motor, la sujeción del actuador y el conexionado eléctrico del mismo. Adicionalmente es necesario solucionar la principal desventaja que este actuador tiene en referencia a sus competidores (esta ya se dejó entrever en el capítulo anterior): al ser un motor de DC es necesario el empleo de un **sensor de posición** para poder realizar actuaciones a punto.

### 3.1 Transmisión de la potencia

Para esta transmisión del par el actuador cuenta con un alojamiento en su eje de forma cuadrada de lado 6 mm, tal y como se observa en el anexo 1. Una de las principales ventajas por las que ha sido seleccionado este actuador es que **la relación par-velocidad en su eje de salida es válida para actuar sobre el propio embrague**, es decir, no necesitamos ningún mecanismo reductor o convertidor de par adicional entre este y el *lifer lever*. Además si esta unión se realizase de forma rígida se tendría otra ventaja adicional: al estar el *lifer lever* integrado en el propio motor (HONDA) y estar diseñado para que el cable de embrague tire de él, es un elemento rígido y fijo que solo tiene permitido girar sobre su propio eje, por lo que **uniendo rígidamente el actuador a él serían eliminados 4 grados de libertad de este**. En este caso solo sería necesario suprimir los dos grados de libertad restantes: el bloque del giro y el movimiento a lo largo del eje, ya que en esta situación el eje de giro del *lifer lever* y el eje de salida del actuador estarían alineados, es decir, pasarían a ser el mismo.

Optando por esta solución se observa que la longitud que sobresale el *lifer lever* del motor **es insuficiente para realizar algún tipo de mecanizado donde encajase el actuador**, por lo que la única solución es el empleo de un **adaptador** el cual si pueda ser mecanizado y posteriormente soldado a la cabeza del *lifer lever*. En este proceso hay que ser especialmente cuidadoso debido a que al unir tres elementos diferentes que deben transmitir un par a lo largo de un eje común, cabe la posibilidad **que estos 3 ejes no estén totalmente alineados**, lo que provocaría la aparición de esfuerzos adicionales que podrían llevar a una rotura prematura de alguno de los 3 elementos.

La primera solución a la que se llega se muestra en la figura 3.1. En ella se muestra cómo serían ensamblados el adaptador (“*adapter*” en la figura 3.1), el actuador y el *lifer lever* (denominado “*OEM clutch lever*”). Como se observa en la figura el adaptador en su parte superior sigue la forma del eje del actuador mientras que en la parte inferior cuenta en primer lugar un cilindro de menor diámetro que hará de **alineador** y seguidamente a él el adaptador se vuelve a ensanchar para proporcionar **una mayor superficie de contacto** para la unión de este con el *lifer lever*.

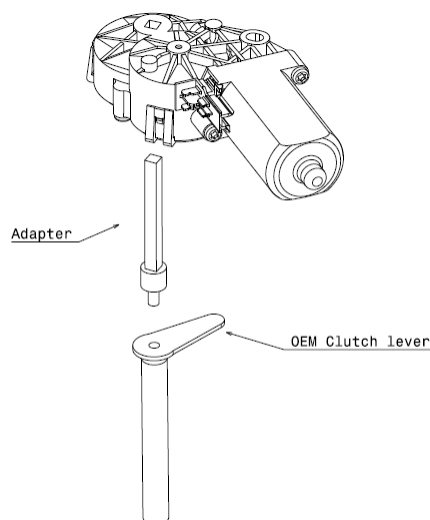


Figura 3.1 Esquema del montaje del embrague



Figura 3.2 Lifter lever mecanizado y ensamblado

Para la obtención del adaptador se parte de un cilindro de acero de 1,2 mm de diámetro. En la parte inferior será realizado un **cilindrado** hasta dejar un diámetro de 6 mm. En réplica a esta operación se hará un taladro de 6 mm de diámetro también en el *lifter lever* de serie del motor de forma que sirva para la correcta alineación de las dos piezas (previo a la operación de soldadura). En la parte superior es necesario dejar una sección cuadrada de 6 mm de lado de forma que el actuador encaje. Esta operación puede conseguirse mediante el **fresado** del cilindro del que se partió. Por tanto solo quedaría por determinar la longitud que tendría cada uno de estos sectores, la cual depende de la posición final que tenga el actuador y que será fijada más adelante. Los planos definitivos se pueden consultar en el anexo 3, especialmente en el 3.1.

La unión entre el adaptador y el *lifter lever* se hará mediante soldadura fuerte de acero en función de la disponibilidad del fabricante (TIG, MIG...) debido a que las solicitaciones de carga y el número de ciclos que va a recibir son elevados. El resultado de la fabricación se puede ver en la figura 3.2 en la que aparece el *lifter lever* ya mecanizado montado en su posición definitiva en el bloque.

A continuación se muestra **el análisis estructural** al que fue sometido el adaptador antes de ser calificado como válido, lógicamente se puede anticipar el resultado de dicho análisis ya que se han mostrado imágenes del *lifter lever* ya mecanizado y soldado. En este análisis **solo se estudió el adaptador** debido a que el *lifter lever* es un elemento original de HONDA y está diseñado para esta función. Para modelarlo correctamente se ha empleado **un empotramiento en la cara** en la que se encuentra soldado al *lifter lever* y una carga uniformemente distribuida a lo largo de las caras donde encajaría el actuador cuyo efecto genera sobre el adaptador un **par de 22Nm**. Para la simulación se empleará el **módulo de CATIA [9]p** destinado a este tipo de análisis “*Generative Structural analysis*”. Gráficamente, los resultados obtenidos en este análisis se pueden observar en las figuras 3.3 y 3.4. Numéricamente los desplazamientos máximos, que se dan en la parte superior del adaptador, CATIA prevé **unos máximos de 0.0156mm**. Por el contrario las tensiones máximas se darán en las zonas marcadas en rojo en la figura 3.3 y tendrán un valor máximo de **102 MPa**, lo cual se encuentra alejado del límite elástico del acero.<sup>4</sup>

A la vista de los resultados se puede calificar el adaptador como **apto para esta aplicación** y por último añadir que las dimensiones del adaptador ensayado así como las de la imagen 3.5 son las definitivas y estas serán justificadas a lo largo de este capítulo. Estas se pueden resumir en: longitud total **54 mm**, longitud parte cilíndrica ancha **19.43 mm** y longitud parte cilíndrica estrecha (centrador) **10 mm**. Los planos se encuentran en el anexo 2.2.

<sup>4</sup> Se toma como límite elástico del acero 210 Mpa, por tanto la tensión máxima que recibe es inferior a la mitad de la carga máxima que podría llegar a soportar.

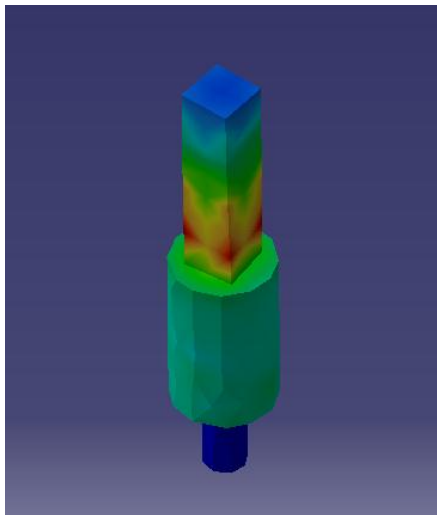


Figura 3.3 Tensiones de von Mises

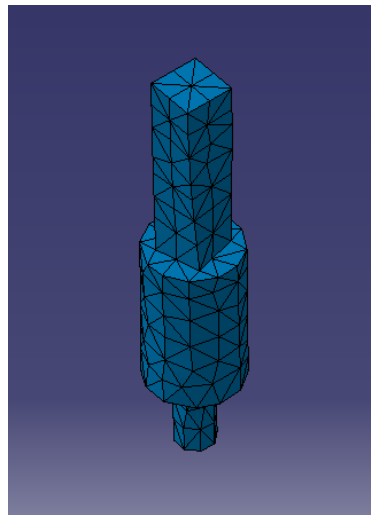


Figura 3.4 Desplazamientos

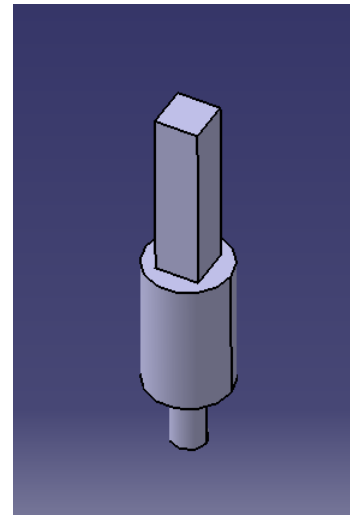


Figura 3.5 Adaptador. Diseño final

### 3.2 Bloqueo del giro y sujeción del actuador

Una vez cerrada la transmisión de la potencia del actuador al embrague solo queda por determinar la forma de bloquear el movimiento del actuador y la instalación del sensor de posición. Se continuará con el **bloqueo del movimiento** ya que en la figura 3.2 puede preverse la solución tomada: serán utilizados los **propios tornillos de la tapadera derecha del motor** para colocar una cogida a la cual vaya fijado el actuador. A esta cogida será fijado el actuador mediante la cavidad que tiene preparada para dicho uso utilizando un tornillo pasante.

De este modo queda cerrado el mecanismo ya que los dos grados de libertad que quedaban (movimiento a lo largo del eje del *lifter lever* y el giro alrededor de este) son contrarrestados por la cogida y el tornillo pasante. En primer lugar se desarrollará un prediseño que cumpla únicamente los requisitos dimensionales y después será reforzado en función de los resultados de los análisis estructurales a los que sea sometida.

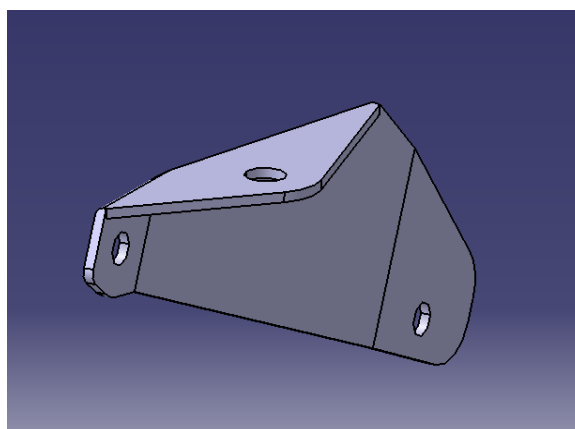


Figura 3.6 Prediseño o versión 1.0 de la cogida del actuador

En la figura 3.6 se muestra dicho diseño de la cogida del actuador **sin ningún refuerzo**. El objetivo es que esta sea fabricada a partir de diferentes recortes de **chapa de acero de 1.5mm** de espesor<sup>5</sup>. En su diseño se ha empleado un modelo 3D del motor HONDA donde además la zona que interviene en este diseño ha sido

<sup>5</sup>Una vez más el diseño se vuelve a ver influenciado por el contexto para el que se realizó: durante la temporada 2016 el equipo ARUS dispuso de generosas cantidades de chapa de acero de 1,5 mm y de maquinaria para trabajarla, este caso es especialmente útil el corte por láser. Este es el porqué de dicha forma y del empleo de la chapa.



reajustada a partir de medidas tomadas manualmente. Una vez que se tiene el prediseño pueden comenzar los análisis estructurales que darán lugar a **procedimiento iterativo** en el que se modificará la cogida en función de los resultados obtenidos para posteriormente ser de nuevo sometida a análisis. En esta parte hay que ser especialmente cuidadoso y asegurar que en cualquier caso ninguno de los refuerzos que se añadan a la pieza den lugar a una interferencia con el bloque motor o el actuador

En los análisis a las diferentes versiones de la cogida se ha impuesto que toda la carga que recibirá la cogida se efectuará a través del tornillo que fija el actuador e igual al valor del par ejercido en el eje del actuador dividido entre la distancia entre este y el eje del tornillo de la cogida. Esta distancia son 52.5 mm y para un par de 22Nm en el eje se obtiene una **fuerza total de 420 N**. De igual modo los tornillos del bloque motor donde va fijada se modelan como dos zonas empotradas.

Bajo estas condiciones los análisis predicen, para la versión básica de la figura 3.6 unos **desplazamientos máximos globales de 0.043 mm** y en la zona del orificio para el actuador de 0.03 mm. El peso teórico de la pieza es de unos **31 gramos**. Resulta especialmente difícil reforzarla debido a que gran parte de superficie se encuentra en contacto con el bloque y es necesario dejar cierto espacio libre para poder introducir una herramienta y apretar el tornillo del actuador correctamente. A pesar de ello se han añadido una serie de recortes de chapa de **1.5 mm de espesor** también con el fin de aumentar el momento de inercia de la cogida. En la figura 3.7 se muestran capturas de las diferentes simulaciones realizadas a la versión básica y a una ya reforzada. En ambas capturas se observan superpuestas tanto la cogida indeformada como la pieza deformada (con factor de escala de 250) y en escala de colores las tensiones máximas y mínimas. En todos los casos las tensiones máximas se encontraron lejos **del límite elástico del acero** y como era de esperar se dan en las zonas próximas a los dos tornillos del bloque motor.

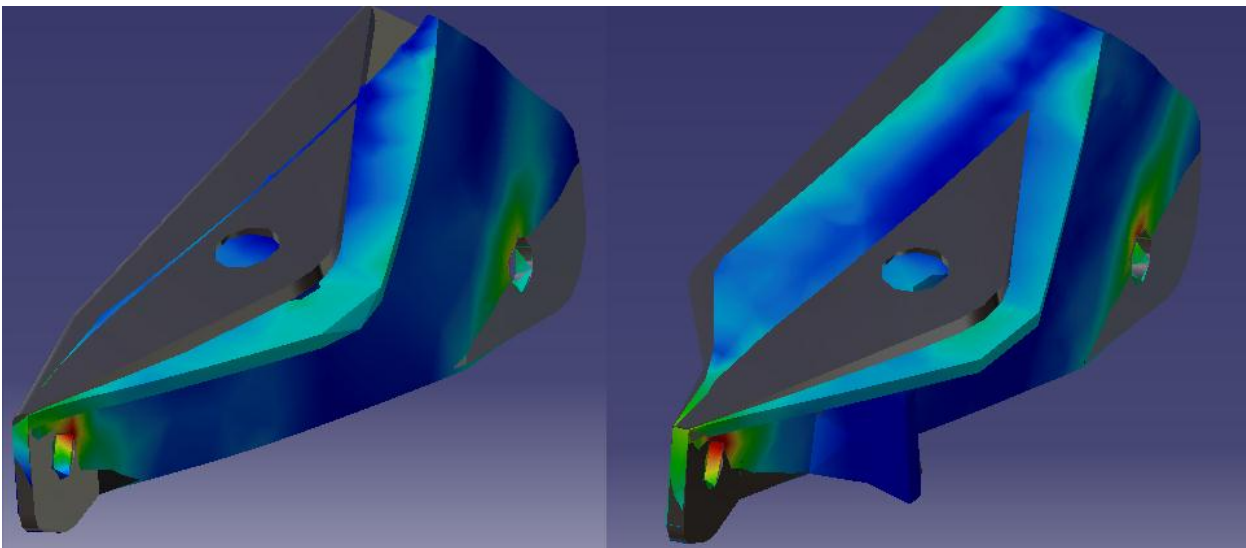


Figura 3.7 Capturas de los ensayos estructurales de las cogidas. A la izquierda la v1.0 y a la derecha la v1.4

Definitivamente **la versión seleccionada fue la versión 1.4**, la cual se muestra en la figura 3.8 debido a que aunque se sigan introduciendo refuerzos los desplazamientos apenas se ven afectados. Esta versión tiene un peso teórico de **46 gramos** y **los desplazamientos máximos en la zona del orificio del tornillo del actuador son de 0.02 mm**. El motivo por el que se seleccionó esta versión se debe a la importancia de disminuir el máximo posible estos desplazamientos **de cara a la fatiga de la pieza** (estará sometida a un alto número de ciclos) **y porque en el momento en el que esta cede el actuador está invirtiendo potencia en deformarla y no la está transmitiendo al eje del lifter lever**. El plano de la cogida se puede consultar en el anexo 2.4, recordar que no es un plano de fabricación debido a que esta pieza se fabrica mediante corte por láser.



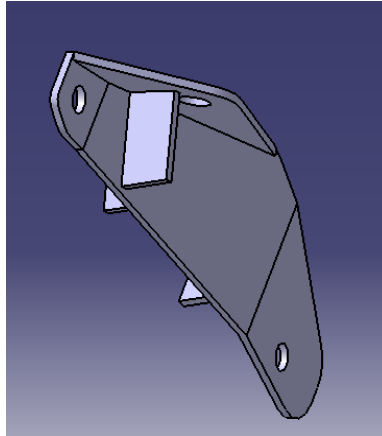


Figura 3.8 Versión 1.4 de la cogida del actuador

Alternativamente a la cogida diseñada en la figura 3.9 se presenta otra cogida que ha sido **producida artesanalmente**<sup>6</sup>. Está fabricada a partir de chapa de acero de 1 mm de espesor, cortada y doblada manualmente y posteriormente reforzada con un perfil cerrado de acero unido a ella mediante soldadura TIG. Además se hicieron 4 taladros, **dos de 5 mm** para los tornillos del bloque y **uno de 6 mm** para atornillar el actuador (el restante es para solventar un saliente que tiene el bloque motor que ayudaba en el montaje del tensor del cable del embrague).



Figura 3.9 Cogida fabricada artesanalmente

### 3.3 Sensor de posición

Una vez concluida la fijación del actuador, solo queda por concretar el sensor de posición, para el cual **se empleará un potenciómetro**. Como el movimiento es rotativo no tiene sentido plantearse un potenciómetro de carácter lineal, así que directamente se apuesta por uno de giro rotativo. Una vez más, será aprovechado el eje pasante del actuador para situar el potenciómetro de forma que el eje del *lifter lever*, el del actuador y el del potenciómetro sean el mismo, de este modo no sería necesario el mecanismo para transferir el giro desde el eje hasta la posición donde se colocase el potenciómetro. El potenciómetro seleccionado es de la marca **Alps**, concretamente es modelo **RK09D113000F** y como características principales se pueden citar: **300° de giro**, **diámetro del eje 6 mm**, **ancho de la base 9.8 mm** y **una resistencia máxima de 10 kΩ** (el resto de características pueden ser consultadas en su *datasheet* adjunto en el anexo 4). Una de las principales razones de su elección son el reducido tamaño de su base, ya que la longitud del eje, en el caso de que se requiera, siempre puede ser reducida.

<sup>6</sup> "Artesanalmente" quiere hacer referencia al proceso de corte de chapa no a la soldadura, ya que tanto esta como la versión 1.4 son soldadas de forma manual.



Figura 3.10 Potenciómetro del actuador

La adhesión del potenciómetro al eje tampoco es trivial debido a que, como su objetivo es medir giro, debe tener una **parte fija desde la que se referencie dicho desplazamiento**. Esta parte fija será la base del potenciómetro la cual es necesario fijar de forma que su eje gire independiente a esta y solidario con el *lifter lever*. Con este objetivo se ha diseñado una **carcasa en impresión 3D** que realice esta tarea y la de proteger las conexiones eléctricas del agua u otro tipo de fluido. Para el diseño de la carcasa se ha empleado el modelo 3D del actuador de forma que esta se adapte a su forma y conseguir un conjunto altamente resistente en un peso mínimo. El material usado para la carcasa es el **plástico ABS** (*datasheet* del material adjunto en el anexo 5).

La carcasa será impresa en dos partes tal y como se muestra en las figuras 3.11 y 3.12 para hacer posible su montaje. La figura 3.11 muestra el primer prototipo de la carcasa en el que se pretendía que la parte superior fuese desmontable, pero esto provoca que el tornillo **no se pueda apretar lo suficiente** como para fijar bien el actuador. Por ello se pasó a la carcasa de la figura 3.12, en la cual se pierde la capacidad de desmontaje debido a que se debe emplear adhesivo en su montaje. Además se han añadido 3 **lengüetas** a lo largo de la carcasa superior para así aumentar la **superficie de contacto** entre una parte de la carcasa y la otra y así mejorar el efecto del adhesivo. El adhesivo que es recomendable usar debe ser específico **para ABS o de cianocrilato**. Debido a que la fuerza a la que va a estar sometido es ínfima, no tiene sentido ningún tipo de ensayo estructural.

El orden en el que se debe proceder durante el montaje es:

- Colocar carcasa inferior y pegarla al actuador.
- Colocar el potenciómetro en su posición y pegar su eje con el eje del actuador. En esta parte hay que ser especialmente cuidadoso para evitar pegar una parte fija con otra móvil.
- Soldar los cables del actuador (son 3).
- Pegar la base potenciómetro a la carcasa inferior.
- Y por último pegar la carcasa superior a la carcasa inferior.

Tanto en la figura 3.11 como en la 3.12 se aprecia que el eje del potenciómetro ya está recortado respecto su longitud inicial. La cavidad del eje de salida del actuador debe ser compartida entre potenciómetro y el *lifter lever* y lógicamente es este último, a través del cual se transmite todo el par, el que se llevará la mayor superficie de contacto. Se llega la siguiente solución de compromiso: de los 34 mm de longitud de la cavidad, el adaptador penetra 25 mm aproximadamente dentro de esta mientras que los restantes 9 mm serán para el sensor de posición. Aquí se encuentra la justificación a las longitudes del adaptador que quedaron abiertas en el punto anterior, ya que la parte cilíndrica con mayor radio de este se alargará hasta servir de apoyo al actuador, tal y como se muestra en la figura 3.12. Todos los planos definitivos se adjuntan en el anexo 3.

También es importante notificar que se ha añadido un **orificio en la parte superior de la carcasa** para introducir las conexiones del sensor. Una práctica muy recomendable es volver a utilizar adhesivo en este orificio entre los cables y la carcasa, consiguiendo de esta forma que si se produjese algún tirón de estos la fuerza no se transmitiese hasta las conexiones del potenciómetro, sino únicamente a la carcasa.

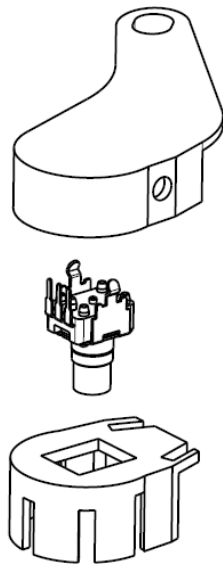


Figura 3.11 Assembly del sensor de posición (presdiseño)

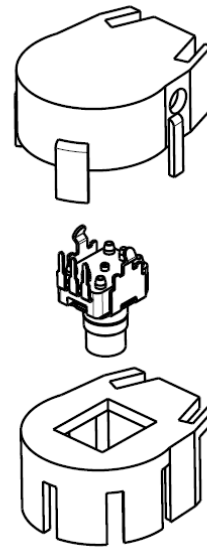


Figura 3.12 Assembly del sensor de posición (versión final)

Recapitulando y poniendo todo en conjunto el **resultado final** de este apartado queda plasmado las figuras 3.13, 3.14 y 3.15. La primera es el modelo 3D del actuador ya ensamblado desde diferentes perspectivas. Las dos figuras siguientes son dos renderizados que dan una visión más realista de cómo quedará el conjunto una vez construido.

Por último en la figura 3.16 puede verse una ilustración gráfica del **montaje general del actuador**. En ella el *lifter lever* aparece fuera del bloque motor, lógicamente esto no es así y solo se ha representado de esta forma para hacer más visual el diagrama de montaje. El sistema se monta con el *lifter lever* colocado en su posición dentro del bloque motor

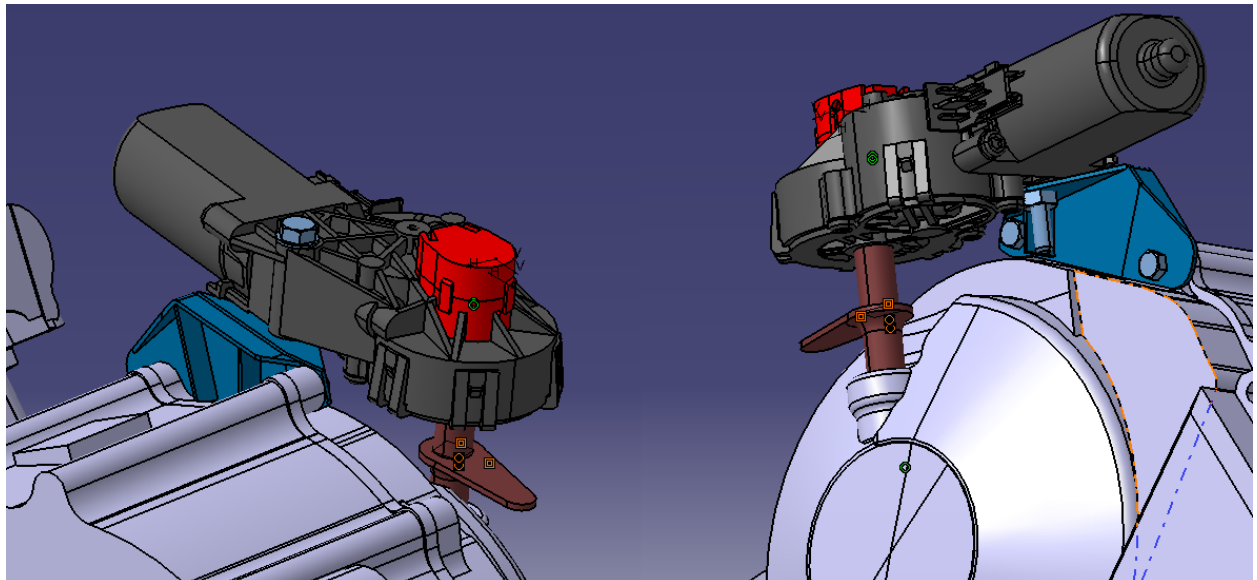


Figura 3.13 Modelo 3D del actuador

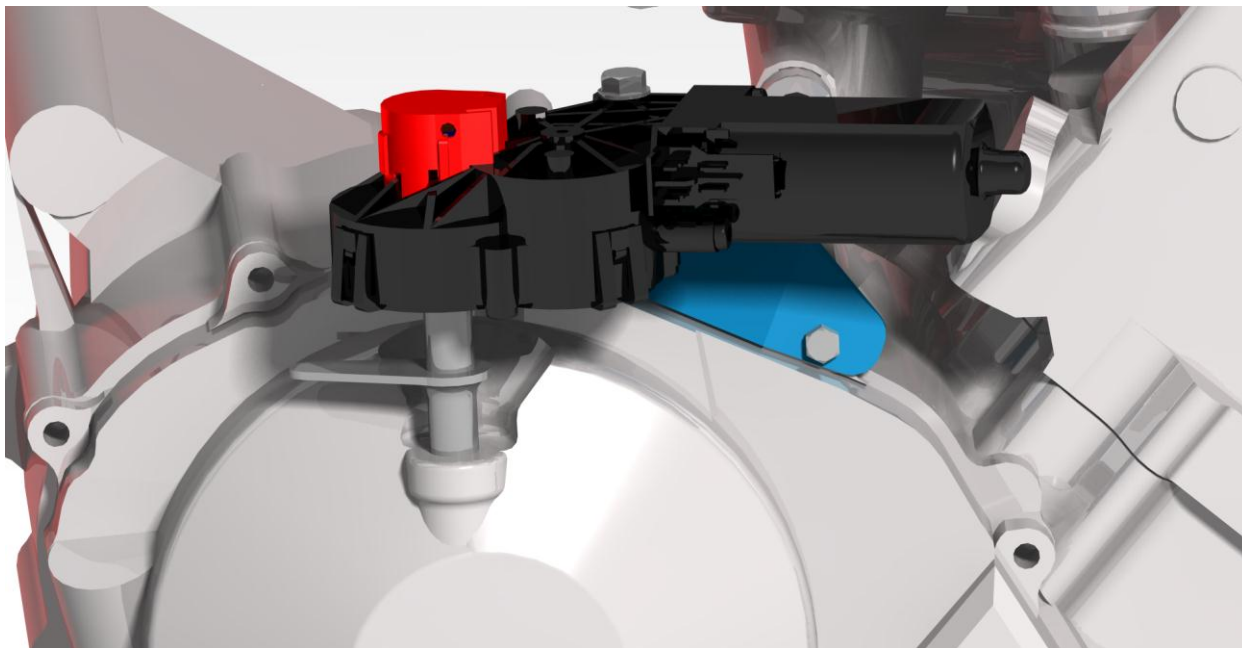


Figura 3.14 Renderizado del actuador

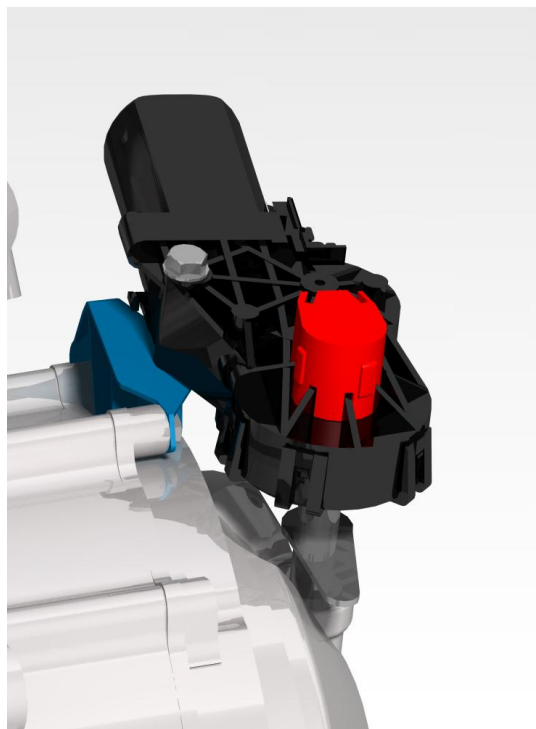


Figura 3.15 Rendirizado 2 del actuador

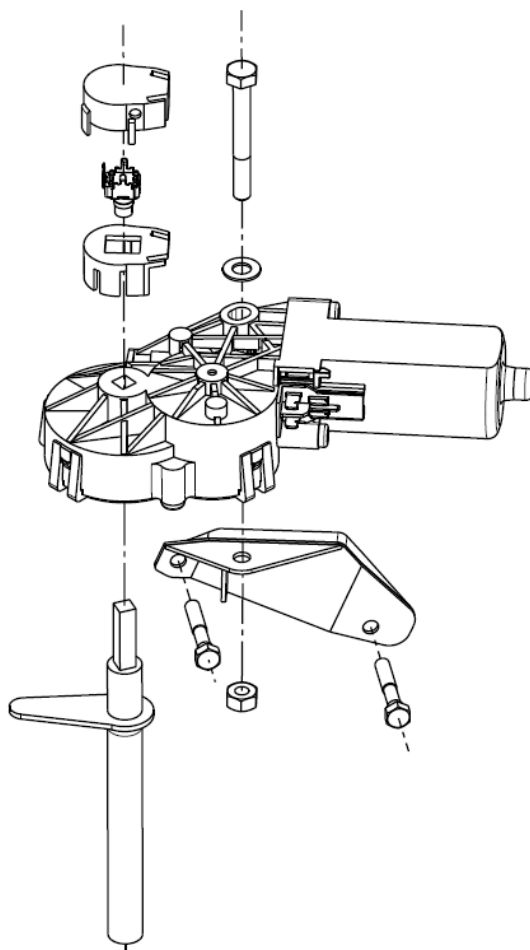


Figura 3.16 Ilustración gráfica sobre el montaje del actuador

### 3.4 Conexionado eléctrico

Los elementos del conjunto del actuador del embrague que necesitan conexión eléctrica son el propio **motor BOSCH** y el **sensor de posición**, siendo ambas conexiones totalmente diferentes.

- Motor BOSCH. Lógicamente al ser un actuador eléctrico necesita de **alimentación eléctrica** que le suministre la potencia necesaria como para comprimir lo muelles del embrague, es por ello que este tipo de conexión en la memoria se conoce como conexión de **potencia o de alimentación**<sup>7</sup> ya que requieren de un cierto nivel de intensidad y tensión (12V). Esta conexión llega hasta los dos pines que tiene el actuador en uno de sus laterales (se pueden ver a lo largo de todas las figuras que hay sobre en él en este capítulo o en el anexo 1). Esta conexión debe permitir hacer girar el motor en un sentido o en otro en función de si se desea **embragar o desembagar**, que al ser un motor de DC esto se consigue alternando **los 12V y la tierra** en estos pines mediante un **punte H** en el controlador.
- Sensor de posición. Dado que el sensor de posición es un potenciómetro necesitará una señal de alimentación y otra de tierra, y a cambio devolverá una señal proporcional a la posición entre estos dos niveles. Estas 3 conexiones se corresponden con las 3 patillas del potenciómetro desde la cual saldrán 3 cables que irán hasta un conector de 3 pines para hacer más fácil su montaje/desmontaje. El conector seleccionado es conector de la marca **REAN** y modelo **RT3FC-B**. El montaje tanto del conector como de las conexiones del sensor se hacen mediante soldadura de estaño, tal y como se muestra en el anexo 10. En el conector recíproco (en este caso el macho) habrá otras 3 conexiones que irán hasta la el controlador del embrague.

Para finalizar este capítulo en la figura 3.17 se muestra un esquema de este conexionado eléctrico donde también se ha añadido el del **actuador del cambio**, donde aparece también su propia controladora como ya se mencionó en el capítulo anterior (el esquema ha sido sacado de su *datasheet* [2] y se puede observar una captura de este en la figura 3.18).

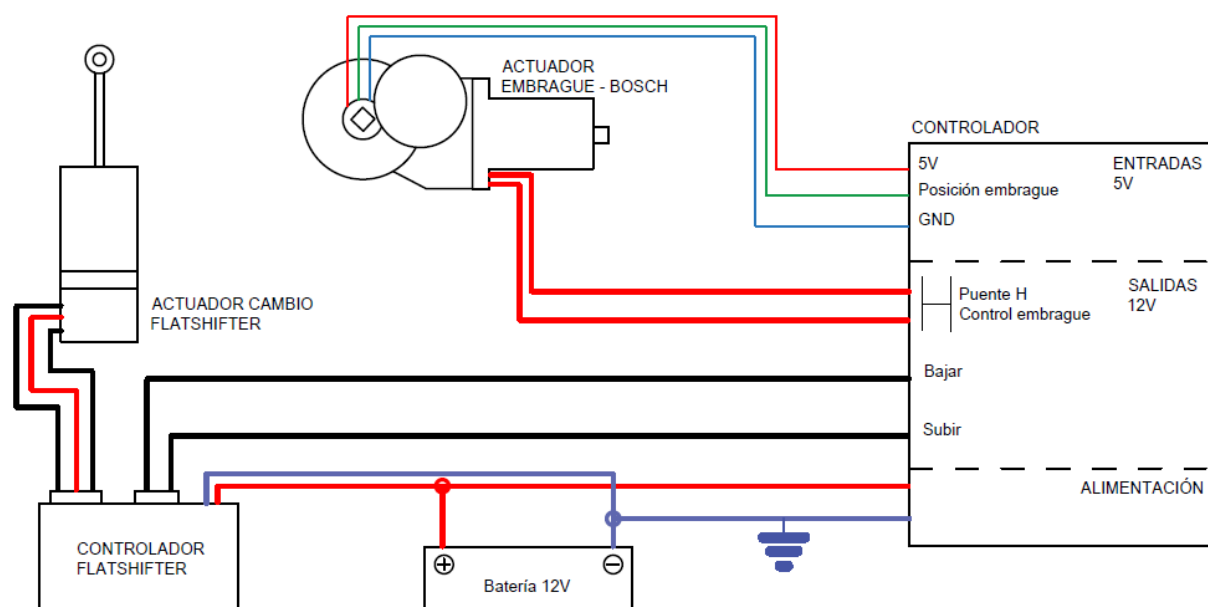


Figura 3.17 Esquema eléctrico para los actuadores

<sup>7</sup>Como se verá más adelante, se diferencian 3 tipos de conexiones o líneas: señal, control y alimentación o potencia. Las de potencia requieren siempre un nivel de tensión de 12V, las de control pueden requerir 12V o 5V (en función del dispositivo) y las de señal trabajan siempre a 5V.

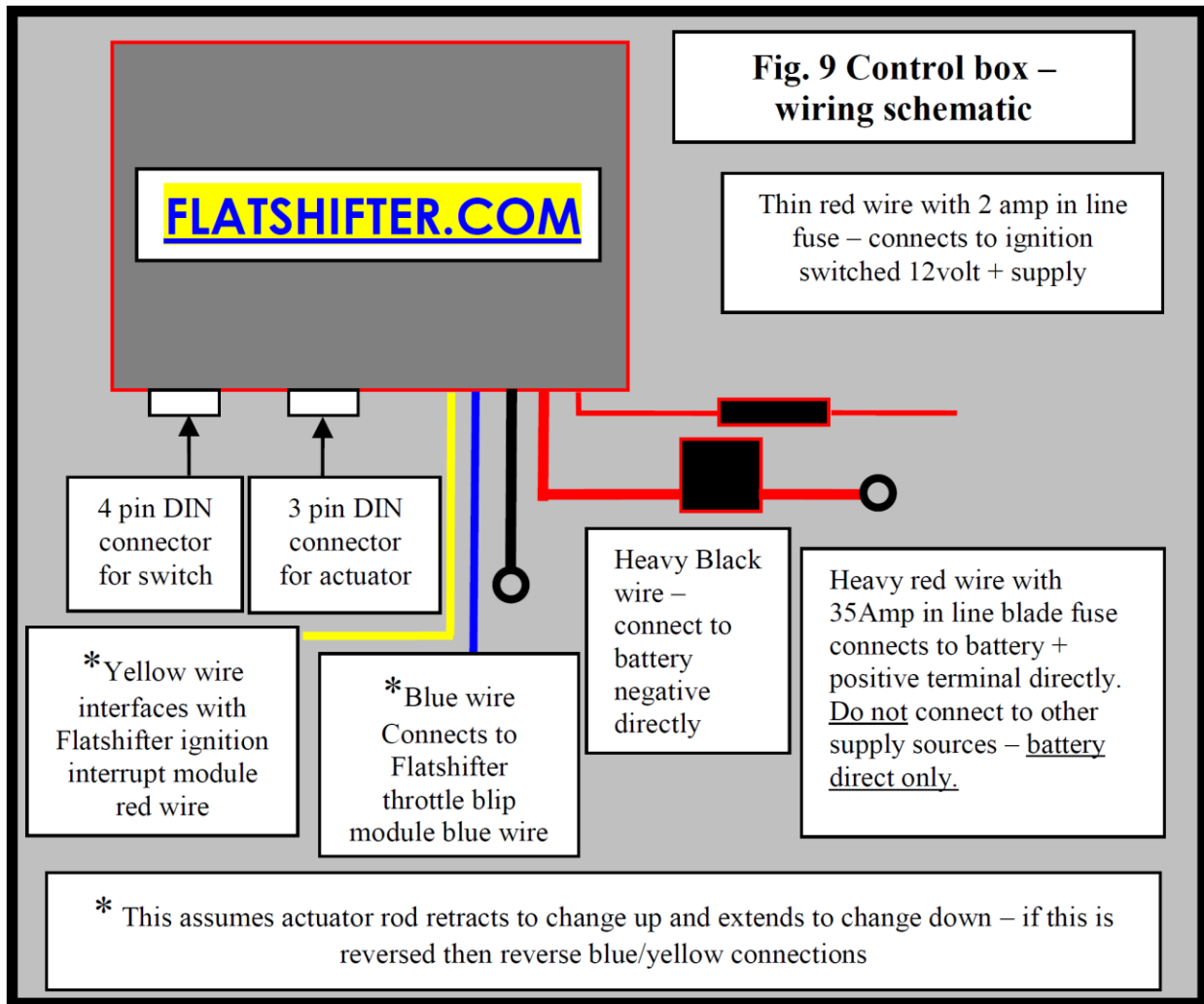


Figura 3.18 Captura del *datasheet* del *Quickshifter* donde se explica su conexionado eléctrico

# 4 DISEÑO DE LEVA

---

Este capítulo se centrará en el diseño de la leva que estará situada en el volante y desde la cual el piloto podrá **controlar el embrague**. Esta pieza es un elemento vital para conseguir un sistema de *clutch-by-wire*. Además de esta, serán necesarias dos levas más para accionar la **subida y bajada** de marcha.

## 4.1 Funcionalidad y localización

Como ya se ha mencionado antes el objetivo de esta leva es controlar la posición del embrague, por lo que resulta básico que cuente con **sensor de posición** de forma que la señal que este proporcione sirva como medida al controlador. Además, el principal uso de esta leva será la puesta en movimiento del vehículo desde parado, en el cual el piloto deberá ir “jugando” con ella como si se tratase de un embrague mecánico, ya que la posición de la leva medida a través del sensor de posición será **directamente proporcional a la posición del actuador del embrague** y por tanto de este.

Existen multitud de posiciones y posibilidades para la localización y la forma de la leva, desde una palanca o tirador en el salpicadero, hasta una leva en el volante. La seleccionada es ésta última debido a las siguientes razones:

- El diseño del volante en el que se va a implementar el sistema de levas posee un **mecanismo de *quick release*** que cuenta con un conector interno de **14 contactos**, por lo que el conexionado eléctrico no será excesivamente complicado.
- **Comodidad para el piloto.** Colocándola en el volante se consigue que el piloto no tenga que retirar la mano del volante en ningún momento desde que esta arranca.
- Posibilidad de **reducción del tamaño y simplificación del diseño del salpicadero**, ya que no debe contar con ningún elemento adicional (tirador, palanca...).
- **Estética.** Algo también importante, pero siempre sin perder de vista la funcionalidad y la utilidad del elemento.

Debido al **reducido tamaño del volante**, figura 4.1, es necesario aprovechar al máximo el espacio disponible de manera que la leva resulte ser lo más ergonómica posible. Antes de continuar es necesario dejar claro cómo será el **procedimiento de puesta en movimiento del vehículo**, debido a que este será el principal uso de esta leva:

1. Con el motor a ralentí y en marcha neutra (o punto muerto) el piloto debe disponerse a introducir primera.
2. Antes de ello, será necesario embragar.
3. Con el motor embragado el piloto introduce primera.
4. Una vez introducida primera y dada la orden de salida, el piloto deberá ir liberando paulatinamente la leva controlando que el motor no se pare, hasta que el cigüeñal y la caja de cambios queden sincronizados.
5. Cuando el motor está en marcha el piloto debe olvidarse de usar la leva del embrague y centrarse únicamente en las de subir y bajar marcha en función de las necesidades del circuito.



Tenemos aquí **una primera restricción**, puesto que el piloto tiene que hacer dos **procesos simultáneos** (meter primera y mientras el vehículo está embragado) la colocación debe ser tal que le permita al piloto hacer cada tarea con cada una de sus manos.

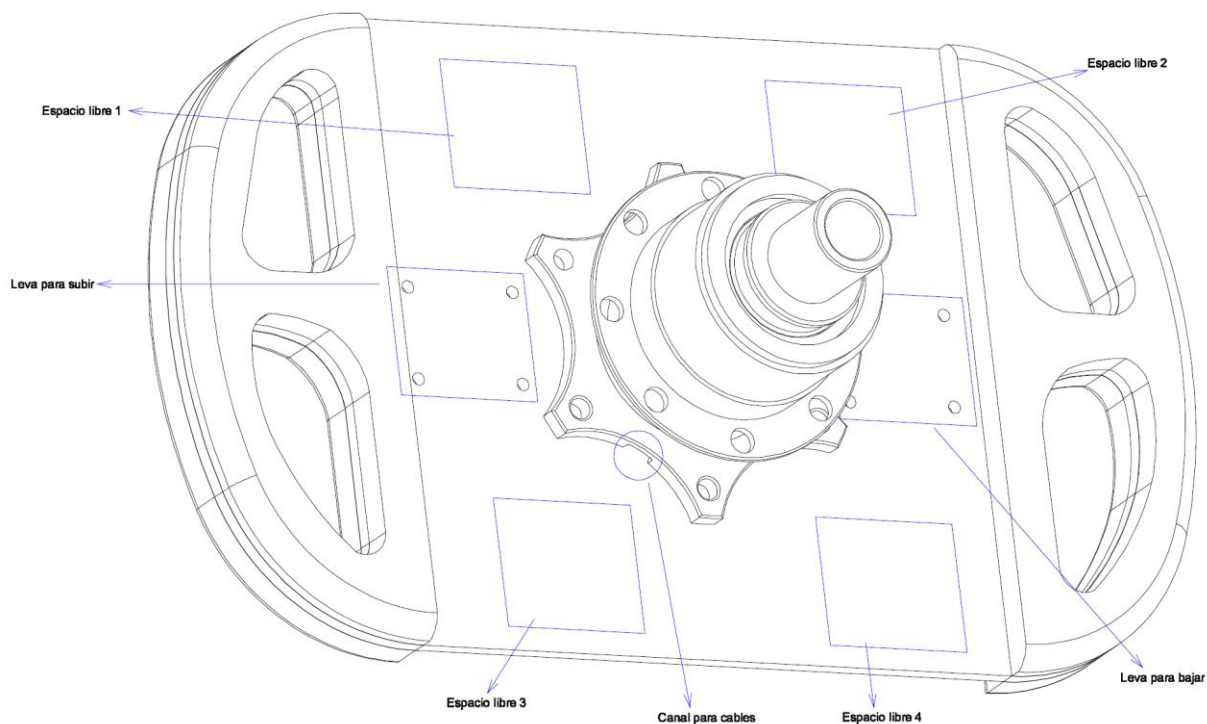


Figura 4.1 Vista trasera del volante

Observando la figura 4.1 existen 4 posibles posiciones para colocar la leva de embrague. Para hacerse una idea del tamaño del volante la placa central (sin tener en cuenta los mangos) tiene un tamaño de **150 mm de alto y 152 mm de largo**. En un principio se planteó la posibilidad de dos levas para el embrague simétricas en los espacios libres 3 y 4 a modo volante de F1, de forma que mediante *software* fuera posible configurarlas a gusto del piloto: solo la izquierda, solo la derecha, dándole la prioridad a la que tenga una posición más embragada, etc. Usualmente los pilotos de F1 utilizan esta última configuración debido a que necesitan "jugar" con el embrague hasta que el monoplaza alcanza aproximadamente la centena de kilómetros por hora, lo cual no es este caso. Por tanto **se decide usar únicamente una leva y adicionalmente se pondrá un pulsador en la parte delantera del volante configurable vía *software***, para activar un "start mode" o "modo salida" que automatice el procedimiento de liberación del embrague o cualquier otra función de este tipo. Además y debido a que para pasar de punto muerto a primera es obligatorio bajar marcha (por constitución de la caja de cambios del motor) será necesario colocar la leva en el lado derecho, es decir, en el **espacio libre 3**.

Otro detalle que se muestra en la figura 4.1 es el canal para los cables de la parte trasera. Al igual que éste existen 2 canales más separados 120 grados del mismo según el eje del *quick release*. Estos canales comunican la parte trasera del volante con el interior del *quick release* donde se encuentra el conector que se une a la columna dirección y comunica el volante con el resto del coche. A través de ellos irán los cables de las levas.

## 4.2 Leva del embrague

Una vez decidida la posición en la que irá la leva hay que ponerse manos a la obra con su **forma y tamaño**. El primer requisito necesario es que la leva no debe sobresalir de la planta del volante debido a la **normativa de la competición** [3]. Por tanto la superficie de la que se dispondrá (dejando ciertos márgenes de seguridad) es la mostrada en la figura 4.2.



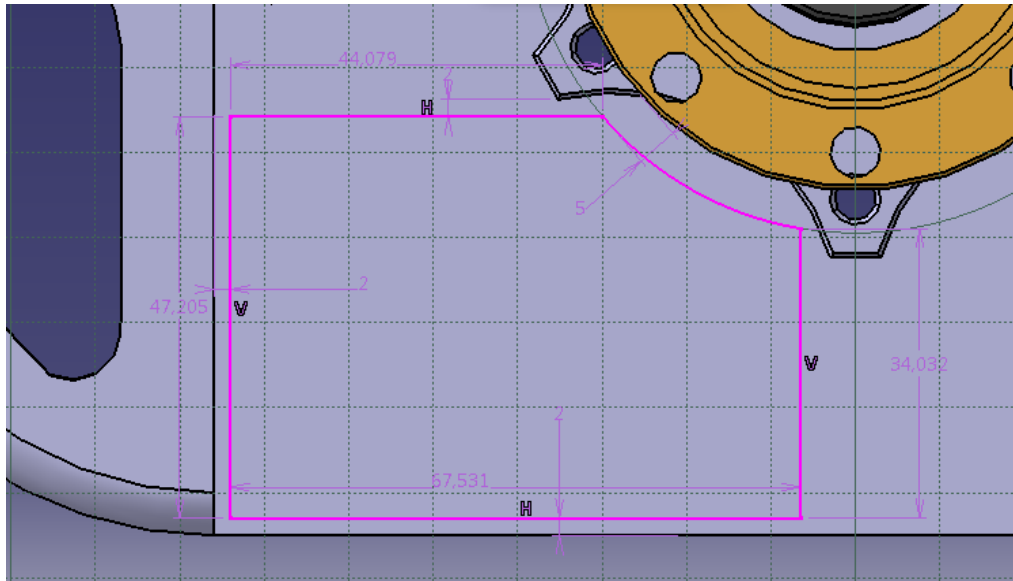


Figura 4.2 Superficie disponible para la leva del embrague

Otro de los requisitos básicos a imponer será el **ángulo de giro de la leva** cuyo valor ha sido fijado tras consultar con diversos pilotos. Este valor será aproximadamente de  $30^\circ$ . Con estos datos se empieza a realizar un primer boceto que poco a poco se irá cerrando de forma automática ya que muchas medidas son funciones o están estrechamente relacionadas con otras (por ejemplo la altura de la leva y su ancho según la figura 4.2) y con la aparición de nuevas restricciones derivadas del objetivo de conseguir una leva lo más ergonómica posible. Además como ya es conocida la superficie vertical máxima disponible (tomando como plano vertical el plano del volante), se empieza a trabajar en un **plano horizontal** para obtener la **sección principal de la leva**, tal y como se muestra en la figura 4.3.

A partir de las levas para embrague observadas en otros monoplazas de otras categorías de competición y estas restricciones se toma la decisión de que el mecanismo se base en un **eje paralelo al plano del volante y de dirección vertical** sobre el cual gire un brazo (también denominado leva en algunas situaciones, valga la redundancia) solidario con el eje de un potenciómetro (que hará de sensor de posición). Tanto la sujeción del eje como de la parte fija del potenciómetro la llevará a cabo una carcasa (o soporte) que además fijará al conjunto a la placa del volante. Por otra parte, es necesario que la leva **retroceda por si misma a una posición de origen** y que cuando el piloto la accione sienta una pequeña **fuerza en contra** de forma que sea fácilmente controlable. Esto se materializará mediante un resorte y debido a que el movimiento es giratorio se hará por medio de un **resorte de torsión ensamblado también en el eje**.

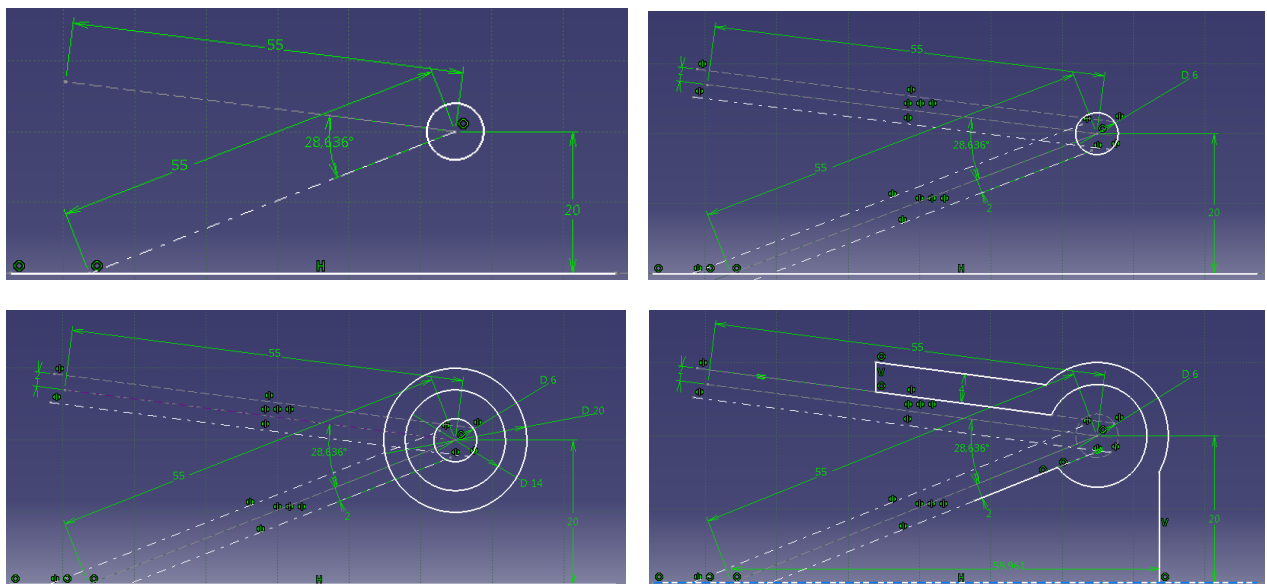


Figura 4.3 Proceso de diseño de la sección principal de la leva

Dado que la leva está pensada para ser construida mediante **impresión 3D** la cual no puede producir voladizos muy destacados, el objetivo es definir la sección principal del mecanismo para que la leva no sea más que una **“extrusión” de esta sección**. Por tanto comienza el diseño en función de los parámetros que ya se han fijado,  $30^\circ$  de ángulo de giro y una longitud máxima en el plano horizontal de 67.531 mm. Antes de llegar al primer boceto de la figura 4.3 es necesario fijar algunos parámetros más, estos fueron la **longitud del brazo, 55 mm**, y la **distancia del eje del mecanismo del plano del volante, 20 mm**. En todo momento se ha buscado: una **leva lo más larga posible** (para tener suficiente superficie de la misma y que le resulte fácil de accionar por piloto), que en la posición de reposo la leva quede lo más paralela posible al plano del volante y que **la estructura no se separe demasiado en la dirección normal al plano del volante**, de forma que no pueda interferir con otros elementos del *cockpit*. Con estos parámetros se obtiene un **recorrido de  $28.64^\circ$**  y un ángulo en reposo<sup>8</sup> con el plano del volante de  **$7.312^\circ$** , los cuales se dan por válidos<sup>9</sup>.

El siguiente paso es pasar de un boceto de líneas a un boceto de una pieza con sus respectivos grosores, para ello se ha impuesto un **grosor mínimo de pared para la impresión 3D de 4 mm**, basándose en la experiencia del fabricante. Además es en este momento en el que es necesario seleccionar también el tipo de potenciómetro que se va usar. Al igual que para el caso del actuador en el capítulo 3 se decidió utilizar el potenciómetro **RK09D113000F** de **Alps** debido al reducido tamaño de su base, aquí este modelo tiene una ventaja más: la **muesca de su eje** permite que no se tenga que emplear **ningún tipo de adhesivo**. Diseñando una leva (o brazo) que siga la forma del eje del potenciómetro **ambos componentes girarán solidariamente**.



Figura 4.4 Imagen del potenciómetro Alps RK09D113000F para la leva del embrague

Con estos datos se llega al **segundo boceto** de la figura 4.3 en el que ha sido añadido el agujero pasante que debe tener la leva en su eje de giro para que encaje el eje del potenciómetro (**6 mm** de diámetro, anexo 3). El grosor de la pared de esta es de **4 mm**.

El **tercer boceto** se centra en la que es posiblemente la parte más crítica, el eje de **giro de la leva**. Éste está constituido en su parte más interna por un hueco cilíndrico de radio 6 mm donde va encajado el potenciómetro (como ya se vio en el segundo boceto). En el siguiente nivel (siguiendo el orden desde dentro hacia fuera) aparece el **eje de la leva**, con sus respectivos **4 mm** de espesor de pared (por tanto se tendrá una corona cilíndrica con un diámetro interno de 6 mm y externo de 14 mm). La leva girará solidariamente con el potenciómetro pero **independiente de la carcasa o soporte**. Por último en la parte más externa se encuentran las paredes del soporte, que una vez más vuelven a tener **4 mm de espesor**, de forma que el eje de giro queda completamente contenido en su interior.

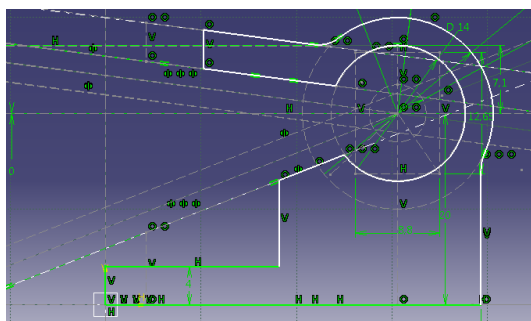


Figura 4.5 Sección principal de la carcasa de la leva del embrague

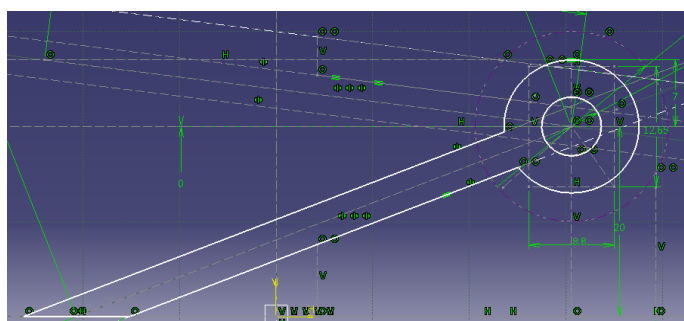


Figura 4.6 Sección principal de la leva del embrague

<sup>8</sup> Cuando se habla de posición de reposo se refiere a la posición donde el muelle está lo más estirado posible y el piloto no está efectuando ninguna presión sobre la leva. También se podría decir que es la posición donde la fuerza elástica producida por el muelle es mínima.

<sup>9</sup> En el caso de que se estime que este ángulo de giro es insuficiente una vez fabricada la pieza siempre se podrá disminuir la longitud del brazo provocando un consiguiente aumento de este, sin necesidad de modificar la carcasa.

Por último en el **cuarto boceto** se ha implementado el tope para la leva y se ha diferenciado la parte de la carcasa de la parte de la leva. Es en este punto en el cual se **separan los diseños del brazo y de su soporte**. Los resultados quedan reflejados en la figura 4.5 y 4.6

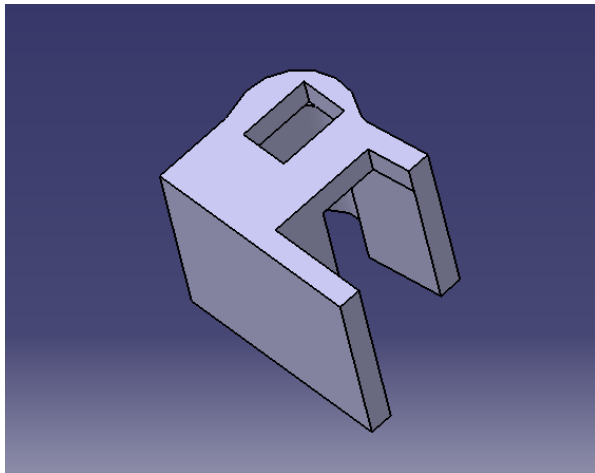


Figura 4.7 Carcasa de la leva del embrague versión 0.4

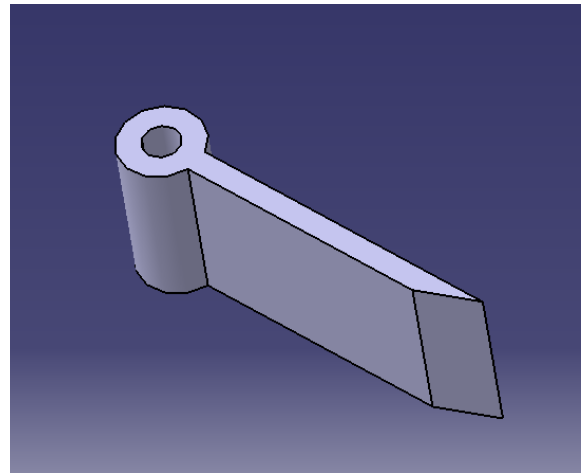


Figura 4.8 Brazo de la leva del embrague versión 0.4

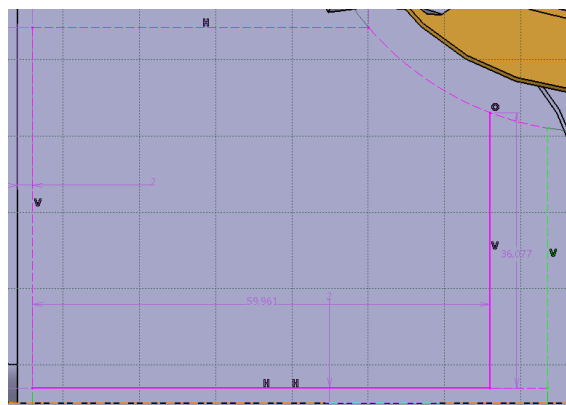


Figura 4.9 Proyección de la planta de la leva del embrague sobre la superficie disponible

Para completar la carcasa se ha añadido **una tapadera superior** que contenga un alojamiento para la base del potenciómetro. Una vez realizadas estas secciones principales se pasa a dar volumen a la leva, **realizando la extrusión** de dichas secciones. El resultado queda reflejado en la figura 4.7 y 4.8. Las dimensiones del mecanismo proyectadas sobre la placa del volante (cuando la leva está completamente contraída) son **59.961 mm de largo** y **36.049 de alto** por lo que está dentro de la superficie que se impuso y no hay posibilidad de interferencia con el *quick release* ni con los mangos del volante (figura 4.9). Por otra parte el punto más separado de la placa del volante se corresponde con el punto más alejado de la carcasa el cual se encuentra a **31 mm de la placa**.

Los modelos y bocetos mostrados hasta ahora de la leva son aun prediseños, es decir, no se han tenido en cuenta tolerancias para partes que se encuentran en contacto o friccionando, ángulos en topes o esquinas, por lo que no son válidos para la fabricación. Los modelos definitivos y planos definitivos se pueden consultar en el anexo 5.

#### 4.2.1 Muelle de torsión

Una parte esencial del diseño de la leva es el diseño y selección del muelle de torsión. El muelle debe aportar tal resistencia a la leva que esta permanezca en su posición de reposo **independientemente de las aceleraciones que el monopla o el volante sufran**; ser lo suficientemente elástico como para completar la totalidad del recorrido más la precarga que recibirá en el montaje y aportar una resistencia que sea fácil y agradable de vencer para el piloto. Una vez seleccionado habrá que ajustar la leva y su carcasa para que el muelle realice correctamente su trabajo.

La decisión de emplear un muelle de torsión en esta aplicación se debe a que aunque se enrollan de la misma manera que los resortes de tensión o de compresión, sus extremos están diseñados para transmitir momentos torsionantes. Además otro aspecto a tener en cuenta de los muelles de torsión es que **trabajan de forma más estable** si el momento aplicado “**enrolla el muelle**”. Requieren también de un elemento centrador para su correcto funcionamiento y puesto que el diámetro disminuye durante la torsión deberá existir una cierta **holgura** entre el centrador y el muelle. En el diseño de muelles de torsión es importante elegir **la forma y tamaño de los topes** o patas en función de la dirección de enrollamiento y el tipo de momento [4].

Tras observar la estructura de este mecanismo y el tipo de movimiento que va a tener se propone un muelle de torsión **del tipo de la figura 4.10** de forma que el **propio eje de la leva haga de centrador**. De este modo la precarga que tendrá en la posición de reposo será la diferencia entre los 90° del muelle no contraído y la apertura que tenga una vez montado. Esta apertura será obtenida a partir de los modelos diseñados anteriormente y teniendo en cuenta que las patas siempre deben formar un ángulo de 90° con el muelle. Haciendo esto se calcula que el ángulo que tendría el muelle montado sería aproximadamente 46° por lo que la precarga será de **44°**, tal y como se muestra en la figura 4.11.

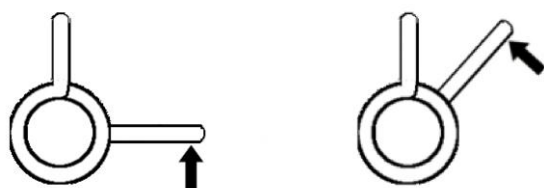


Figura 4.10 Esquema del tipo de enrollamiento seleccionado

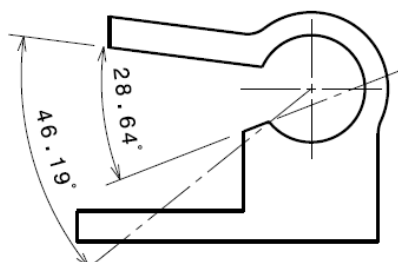


Figura 4.11 Estimación de la precarga que tendrá el muelle

El último paso requerido antes de comenzar con el cálculo del muelle es fijar la fuerza necesaria que debe ejercer el muelle. En primer lugar se calcula **la fuerza másica máxima** que sufrirá la leva en caso de aceleración del vehículo de forma que la fuerza que realice el muelle sea siempre superior para evitar que esta se accione de forma indeseada. Suponiendo que no se tendrán aceleraciones superiores a 3 g y que esta se produjese en la dirección más favorable a generar error (dirección perpendicular a la línea que une el centro de gravedad con el eje de giro de la leva y dentro de un plano perpendicular a este), el par al que daría lugar sería:

$$F = m \cdot a = d \cdot V \cdot a = 0.216N \rightarrow M = F \cdot dist = 4.46 \cdot 10^{-3} Nm \quad (4.1)$$

Donde  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ,  $V = 8,553 \text{ cm}^3$  y  $d = 1.24 \text{ g/cm}^3$ . La densidad se ha obtenido a partir del material de la impresión, el **PLA 3d850**, cuya densidad es **1.24 g/cm³** y se ha impuesto un llenado del 100% a la hora de realizar la impresión<sup>10</sup>. La distancia entre el centro de gravedad y el eje se obtiene del modelo 3D (al igual que el volumen empleado en la fórmula 4.1) y es de **20,65 mm**. El *datasheet* del PLA se puede consultar en el anexo 6. Con estos valores se obtiene que el par que debe ejercer la precarga del muelle debe **ser superior a 4,46 mNm**.

La siguiente fuerza a tener en cuenta es la que hace el piloto para controlar la leva, que tras varios ensayos se decidió fijar en torno **150-300 gramos** los cuales se supone que se ejercen de manera uniforme en la segunda mitad del brazo de la leva tal y como muestra la figura 4.12. Bajo esta suposición el problema puede simplificarse a un problema bidimensional, por lo que el **par generado en el eje** será de aproximadamente **0.0692 Nm** (para 150 gramos), por lo que cumpliendo este requisito se consigue también el de la aceleración del vehículo ( $0.0692 \text{ Nm} > 4.43 \text{ mNm}$ ).

$$M = F \cdot d = 0.15 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \left( \frac{3 \cdot 0.05342}{4} + 0.007 \right) = 0.0692 \text{ Nm} \quad (4.2)$$

$$F = \frac{M}{d} = \frac{0.0923 \text{ Nm}}{\left( \frac{0.01}{2} + 0.007 \right) \text{ m}} = 5.77 \text{ N} \quad (4.3)$$

<sup>10</sup>Las impresoras 3D permiten generar impresiones con cierta porosidad interna, es decir, no se produce un “llenado” completo de esta y por tanto la densidad que tendría la pieza final es inferior al del plástico antes de ser imprimido. Con esta práctica se consigue ahorro del material empleado en la impresión a cambio de perder ciertas propiedades mecánicas.

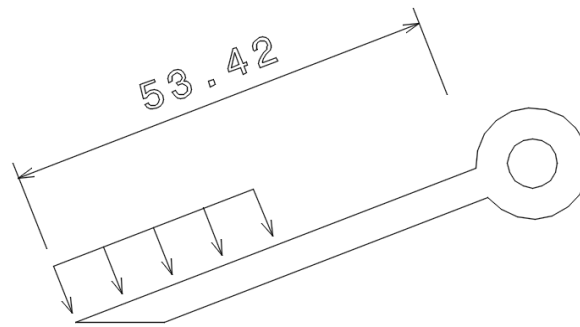


Figura 4.12 Esquema de cómo será aplicada la fuerza en la leva

Aplicando el mismo procedimiento y suponiendo que el muelle ejerce su fuerza uniformemente en los **primeros 10 mm** de la leva (hay que tener en cuenta el diámetro) es necesario que la fuerza del muelle sea de **7.69 N**. Los cálculos se recogen en las ecuaciones (4.2) y (4.3). En ambas la distancia tomada es la existente entre el centro de aplicación de la carga y eje de la leva, siendo para el primer caso igual a  $\frac{3}{4}$  de la longitud de la leva más el radio del eje central y en el segundo caso la mitad de la distancia de la zona donde aplica más el radio del eje central (todo en SI). Con estos datos da comienzo el procedimiento de **cálculo del muelle**.

Para el cálculo de muelles a torsión se aplica la teoría de flexión de sólidos con curvatura, añadiendo un pequeño coeficiente, denominado **constante de Wahl**, que cuantifica **las tensiones residuales** que aparecen en el proceso de fabricación [4]. Estas intervienen a favor o en contra en función de que el muelle trabaje abriendo o enrollándose. Entonces para un muelle de torsión de diámetro interno “ $D_i$ ” y diámetro de hilo “ $d$ ” se tiene:

$\sigma = \frac{32 M}{\pi \cdot d^3} K_C \quad (1)$	$K_C = \frac{4C^2 \pm C - 1}{4C(C \pm 1)} K_C \quad (2)$	$D'_i = D_i \frac{N_a}{N'_a} \quad (3)$
$\theta_{rev} = \frac{10,18 \cdot M \cdot N_a \cdot D}{E \cdot d^2} \quad (4)$	$K_\theta = \frac{M}{\theta_{rev}} = \frac{E \cdot d^2}{10,18 \cdot N_a \cdot D} \quad (5)$	$N'_a = N_a + \theta_{rev} \quad (6)$

Tabla 4.1 Formulas para el cálculo de un muelle a torsión

Donde:  $\sigma$  = **Tensión del material**;  $M$  = **Par ejercido**;  $E$  = **Módulo de Young**;  $K_C$  = **Constante de Wahl**;  $C$  = **Curvatura**;  $N_a$  = **Número de espiras útiles**;  $K_\theta$  = **Coefficiente del muelle**;  $\theta_{rev}$  = **Ángulo girado**.

Se puede comprobar que en los muelles de torsión existe una **relación lineal** entre el par recibido y el ángulo girado siempre que no se supere la tensión máxima del material. En la fórmula para el cálculo del coeficiente de Wahl (expresión 2 de la tabla 4.1) será usado el signo “+” en el caso de que el muelle se esté enrollando y el signo “-” cuando el muelle se esté abriendo. En la figura 4.13 se muestra la **evolución de la constante de Wahl** en la cara interna y externa en función de la curvatura.

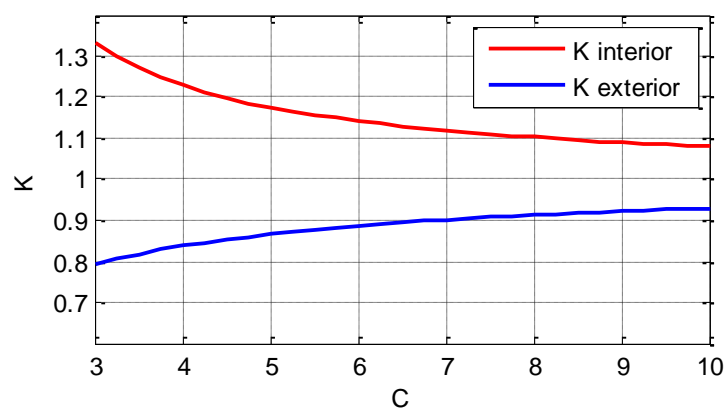


Figura 4.13 Evolución del coeficiente de Wahl en función de la curvatura

Es posible afirmar entonces que los **parámetros que influirán** en el diseño del muelle de torsión son:

- **Diámetro del muelle.** Un menor diámetro aumentará la resistencia de nuestro muelle.
- **Diámetro del hilo.** Cuanto mayor sea el diámetro más resistencia nos aportará.
- **Longitud del muelle.** Definirá el número de espiras útiles.
- **Longitud de las patas.** Para este caso este parámetro es algo que se puede considerar impuesto, siempre se aplicará la fuerza en una zona similar cercana al eje. Esta es **10 mm**.

El material empleado para el muelle será **acero inoxidable**. Comienza ahora un **proceso iterativo** en el que se partirá de unos valores iniciales(  **$D_e = 14\text{ mm}$ ,  $d = 1\text{ mm}$ ,  $l = 8\text{ mm}$** ) hasta llegar a una solución que cumpla los requisitos de fuerza. Una vez alcanzados se comprobará que el muelle pueda ser insertado en el prediseño. En el diseño del muelle también se ha empleado una **plataforma online** que permite calcular el muelle más rápidamente y posteriormente el suministro de este. Esta plataforma se encuentra asociada al fabricante de muelles “Muellestock” que aplica unos coeficientes de seguridad basados en su amplia experiencia en el sector además de que todos sus productos están avalados por norma **ISO: 9001** que certifica la calidad de los mismos [5].

Tras varias iteraciones se llega a la solución mostrada en tabla 4.2 y la figura 4.14.

Largo	14 mm
Hilo	2 mm
Diámetro exterior	14 mm
Diámetro interior	10 mm
Pata 1	10mm
Pata 2	10 mm
K (DaN/vuelta)	52.10

Tabla 4.2 Dimensiones del muelle

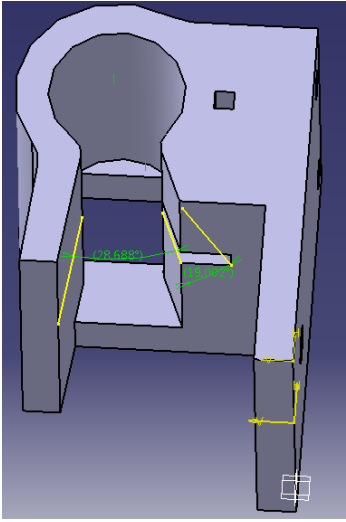


Figura 4.14 Ángulos del muelle

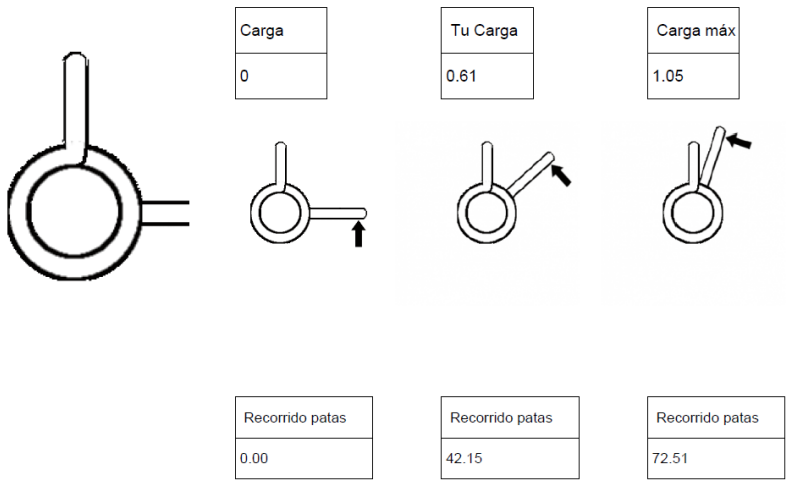


Figura 4.15 Esquema del muelle bajo diferentes estados de carga

Los planos del muelle proporcionados por el fabricante Muellestock se encuentran en el anexo 7.

Como puede observarse se llega a una **solución de compromiso** respecto a los requisitos que han sido enumerados anteriormente. Es necesario realizar varias modificaciones a la estructura de la leva para que el muelle encaje y pueda trabajar correctamente. Se comprueba que la precarga del muelle será de **42.31°** y el par generado aproximadamente de unos **0.0732 Nm** que es próximo a los **0.0692 Nm** correspondientes a los 200 gramos. En el límite del mecanismo el muelle ha girado unos **71°** (28.69° más que en la posición inicial) y en esta situación el par generado es de **0.126 Nm**. Es importante también calcular cual será el **diámetro mínimo** en esta posición para modificar el **brazo de la leva**. Para ello se ha usado la expresión 3 de la tabla 4.1. Este último cálculo y los anteriores están representados en las siguientes ecuaciones:

$$\theta_{precarga} = 90^\circ - (28.69^\circ + 19^\circ) = 42.31^\circ \quad (4.4)$$

$$\theta_{máximo} = 90^\circ - 19^\circ = 71^\circ \quad (4.5)$$

$$M_{precarga} \approx 0.61 \text{ DaN} \cdot \frac{1.02 \text{ kg}}{1 \text{ DaN}} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \left( \frac{0.01}{2} + 0.007 \right) = 0.0732 \text{ Nm} \quad (4.6)$$

$$M_{máximo} \approx 1.05 \text{ DaN} \cdot \frac{1.02 \text{ kg}}{1 \text{ DaN}} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \left( \frac{0.01}{2} + 0.007 \right) = 0.126 \text{ Nm} \quad (4.7)$$

$$D' = 10 \frac{5}{5 + \frac{71^\circ}{360^\circ}} = 9.62 \text{ mm} \quad (4.8)$$

Según la ecuación (4.8) se observa que el diámetro final será aproximadamente **9.62 mm**. Conocido este dato se podrá terminar el diseño del brazo de la leva al cual también será añadida una guía en la que se introducirá la pata del muelle que gira solidariamente con él.

#### 4.2.2 Diseño final

Tras llegar a la solución para el montaje del muelle hay que determinar cómo será la unión de la leva al volante. La solución propuesta es el empleo de **3 tornillos** (2 M3 y un M4) distribuidos a lo largo del plano de la leva que está en contacto con el volante. Además para hacer más sencillo el montaje, las tuercas de los tornillos M3 quedan incrustadas dentro de dos cavidades que se adaptan a la forma de ellas. El resultado aparece plasmado en las figuras 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19.

Por último para completar el diseño se añadirá **una tapadera** para cerrar el conjunto por la parte inferior e impedir que se desmonte. La tapadera seguirá la forma del soporte del brazo y contará con dos centradores, uno para fijar el eje (el potenciómetro girará en torno a este eje) y otro como centrador para facilitar el montaje de esta.

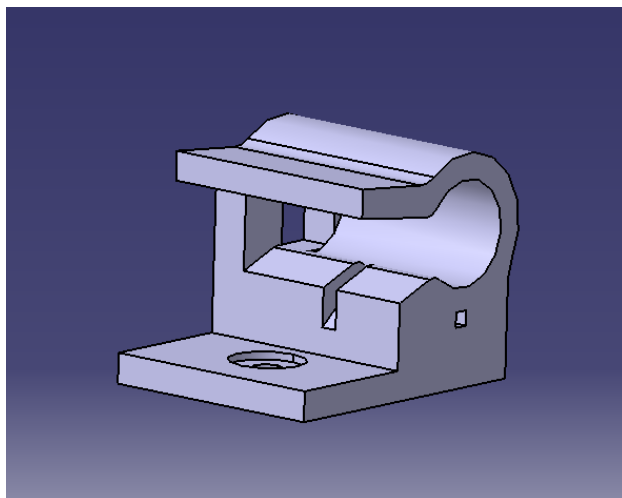


Figura 4.16 Modelo definitivo para el soporte de la leva.

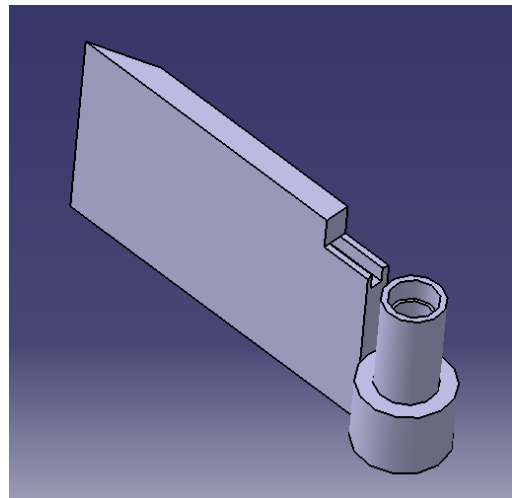


Figura 4.17 Modelo definitivo para el brazo de la leva



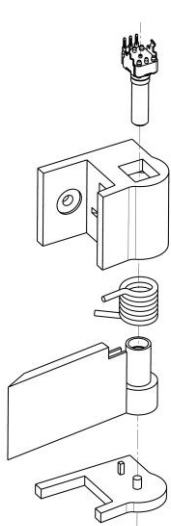


Figura 4.18 Esquema del montaje de la leva del embrague

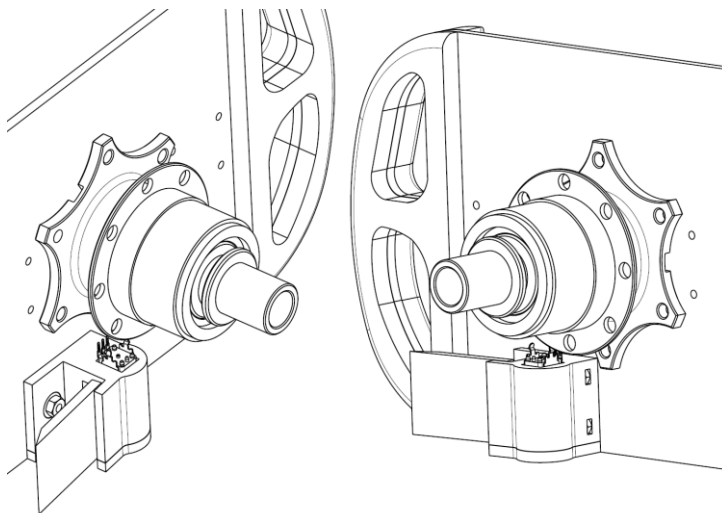


Figura 4.19 Leva embrague montada en el volante

Para el montaje de la leva se recomienda el empleo de algún pegamento para impresión 3D o para plástico (cianocrilato), especialmente para la tapadera y la base del potenciómetro, asegurándose siempre de no fijar ninguna parte móvil. Respetar siempre las horas de pegado que recomiende el fabricante.

### 4.3 Volante completo y conexionado eléctrico

Faltaría únicamente definir las levas para bajar y subir de marcha. Su diseño no va a ser objeto de esta memoria debido al enorme abanico de posibilidades. El único requisito es que deben accionar un **pulsador** de forma que cerrando el circuito envíen al controlador una señal del tipo digital indicando que tiene que comenzar la acción de subir o de bajar en función de cual haya sido accionada.

Con este objetivo en esta memoria se proponen **dos placas de fibra de carbono** con forma de leva y de muy bajo espesor de forma que flecten fácilmente, pero recuperen su forma por sí solas. De este modo fijándola en un extremo y colocando el pulsador en la otra se obtiene una leva válida para esta función. El resultado se encuentra en la figura 4.20 donde está reflejado un renderizado del modelo volante con todas sus levas. Adicionalmente también aparecen una imagen de volante real y las levas una vez fabricados y montados en la figura 4.21.

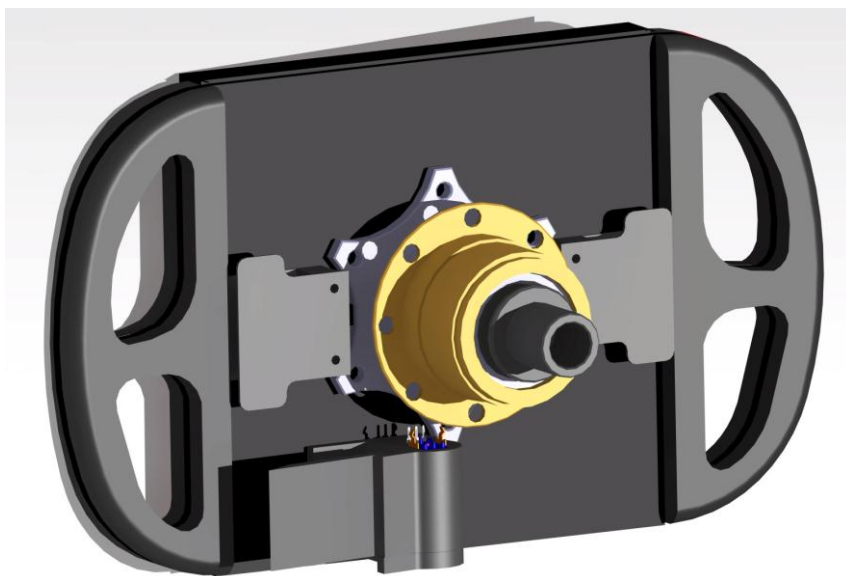


Figura 4.20 Renderizado del volante completo



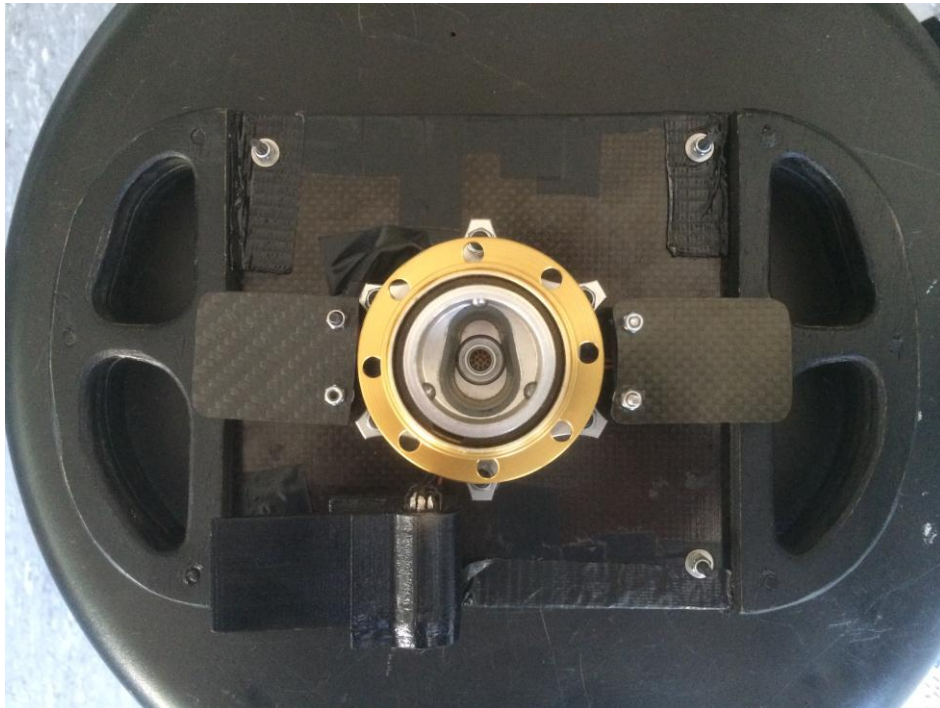


Figura 4.21 Fotografía del volante una vez fabricado y montado

Para cerrar este capítulo se explicará el conexionado eléctrico que requiere la parte del cambio situada en el volante. Un aspecto importante para la descripción del conexionado eléctrico es el papel que juega el **conector del quick release** que puede verse en la fotografía de la figura 4.20 en interior del mismo. Como ya fue dicho anteriormente todas las conexiones eléctricas del volante con el exterior se harán por medio de dicho conector de 14 pines. Una vez hecha esta aclaración se pasará a estudiar el esquema eléctrico mostrado en la figura 4.22.

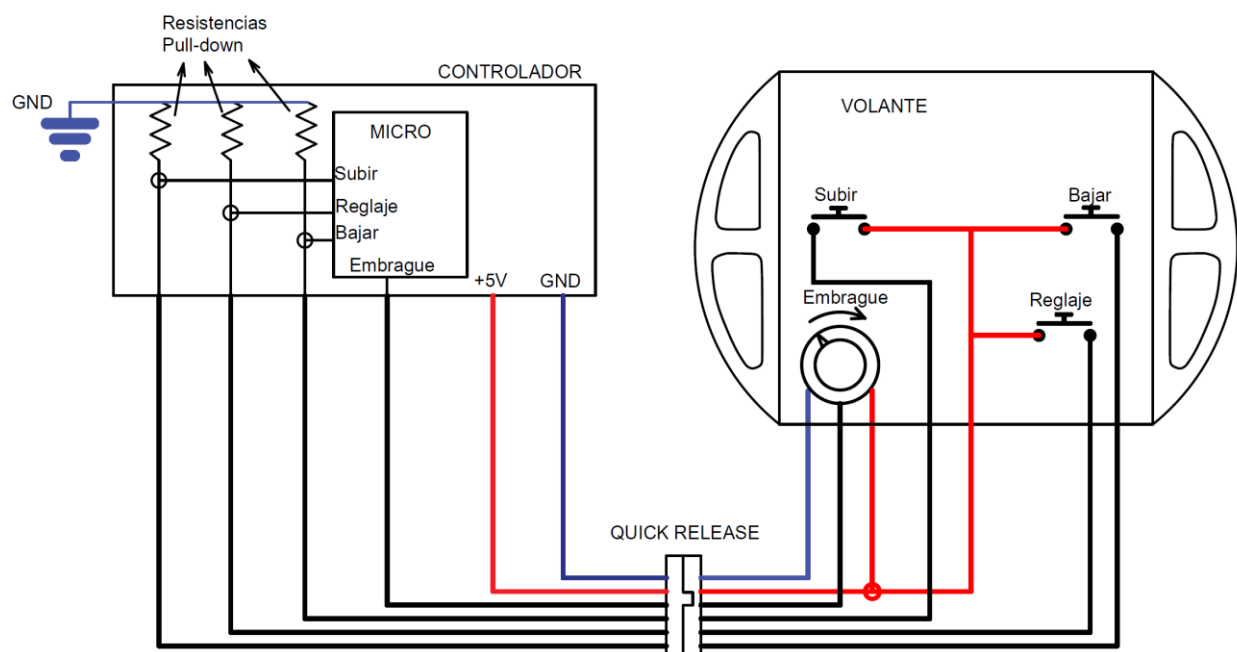


Figura 4.22 Esquema eléctrico del volante

Como se puede ver han sido empleadas **resistencias de pull-down** para los pulsadores, de este modo cuando cualquiera de los pulsadores se accione el micro recibirá un nivel alto (5V) en su entrada correspondiente. Por otra parte también ha sido colocado adicionalmente **el pulsador de libre configuración vía software**. Este pulsador no se acciona mediante una leva sino que estará situado en la parte delantera del volante de forma que el piloto pueda accionarlo con el dedo pulgar. El objetivo de este pulsador es dotar al sistema de una **función adicional** fácilmente configurable por *software* en el controlador. Esta función puede ser por ejemplo una **salida automática** que permita al piloto no tener que soltar la leva del embrague paulatinamente o por ejemplo un **cambio en el reglaje de la leva** del embrague (de esta función viene su nombre en la figura 4.22), es decir, en el supuesto caso en el que la posición más contraída de la leva se corresponda con el 95% de la posición máxima del actuador, se podría pasar mediante el accionamiento de este botón a un valor del 80% de la posición máxima del actuador (u otro valor que se configurase por *software* en función de las preferencias de cada piloto).

Por último para atenuar el ruido eléctrico del sensor de posición de la leva del embrague se puede emplear un par trenzado para la señal del potenciómetro y su referencia (en la figura 4.22 GND) durante la construcción del cableado y emplear cable apantallado para evitar interferencias. Para el resto de señales (subir, bajar y reglaje) resulta innecesario el empleo de esta técnica ya que tienen un comportamiento digital (discreto) de 5V de diferencia y además un funcionamiento con una frecuencia inferior en muchos casos a 1Hz.

# 5 CONTROLADOR

---

En este capítulo se explicará más en profundidad el funcionamiento del controlador y será llevado a cabo su diseño. Haciendo un resumen de lo mencionado hasta ahora, el sistema debería tener 5 entradas y 4 salidas. Como se verá más adelante además de las correspondientes entradas de alimentación será añadida una salida más.

## 5.4 Funcionalidad

A lo largo de toda la memoria se ha hecho alusión a tareas o funciones que debe hacer el controlador. Esto es así debido a que el controlador es sin duda la parte más importante del sistema y sin la cual sería imposible el funcionamiento del mismo. El controlador es el encargado de **controlar y coordinar** los actuadores en función de los **sensores** y las **órdenes del piloto**. Una vez definida la función del controlador se hará un recuento de todas las entradas y salidas que tiene además de una breve explicación de cada una de ellas.

Entradas:

- **Posición de embrague (analógica).** Señal analógica que genera un voltaje proporcional a la posición angular del actuador del embrague y por tanto, de este. Esta señal será utilizada por el controlador para llevar el embrague hasta una determinada posición.
- **Posición leva embrague (analógica).** Señal analógica que genera un voltaje proporcional a la posición angular de la leva del embrague. Esta leva será accionada por el piloto para indicarle al controlador que lleve el embrague hasta una determinada posición.
- **Subir (digital).** Señal digital procedente de la leva de subir que proporciona un nivel alto al controlador para que este comience a ejecutar el procedimiento de subida. Lógicamente, es el piloto el que tiene el control de esta leva.
- **Bajar (digital).** Señal digital procedente de la leva de bajar que proporciona un nivel alto al controlador para que este comience a ejecutar el procedimiento de bajada una vez que esta haya sido accionada por el piloto.
- **Función adicional (digital).** Señal digital procedente de un botón situado en el volante que proporciona un nivel alto al controlador cuando se desee que este realice la función adicional que haya sido configurada vía *software*. Estas funciones pueden ser una salida automática o un cambio en el reglaje de la leva, tal y como se describió en el capítulo anterior.

Salidas:

- **Subir marcha.** Señal que indica al controlador del actuador del cambio (*Quickshifter*) que suba marcha. Esta es una señal de control ya que la alimentación la recibe el controlador por otra vía.
- **Bajar marcha.** Señal que indica al controlador del actuador del cambio (*Quickshifter*) que baje marcha.

- **Embragar.** Esta salida junto con la siguiente forman la pareja de salidas del puente H, encargado de controlar el sentido de giro del actuador (embragar o desembragar). De este modo, activando el puente H en un sentido el controlador consigue que el motor BOSCH embrague, mientras que en el sentido contrario realiza la acción opuesta.
- **Desembragar.** La otra salida de la pareja del puente H. Cuando el controlador active el puente H con esta polarización el motor del embrague se moverá en el sentido de desembragar.
- **Corte de encendido.** Señal que indica a la ECU que debe cortar la chispa de las bujías durante un cierto tiempo. Por tanto es una señal de control cuyo nivel alto equivale a 12V. La ECU puede configurarse de diferentes modos para que se comporte de un modo u otro una vez reciba esta señal. Esta configuración se concretará durante **la puesta a punto del cambio**. Implementando esta función se consigue que sea posible **subir sin levantar el pie del acelerador** y por tanto realizando mucho más rápidos los cambios en subida.

Todas las **salidas funcionan a 12V** ya que los receptores trabajan con este nivel de tensión (para el caso de actuador) o entienden este como nivel alto lógico (para el caso señales de control entre controladores).

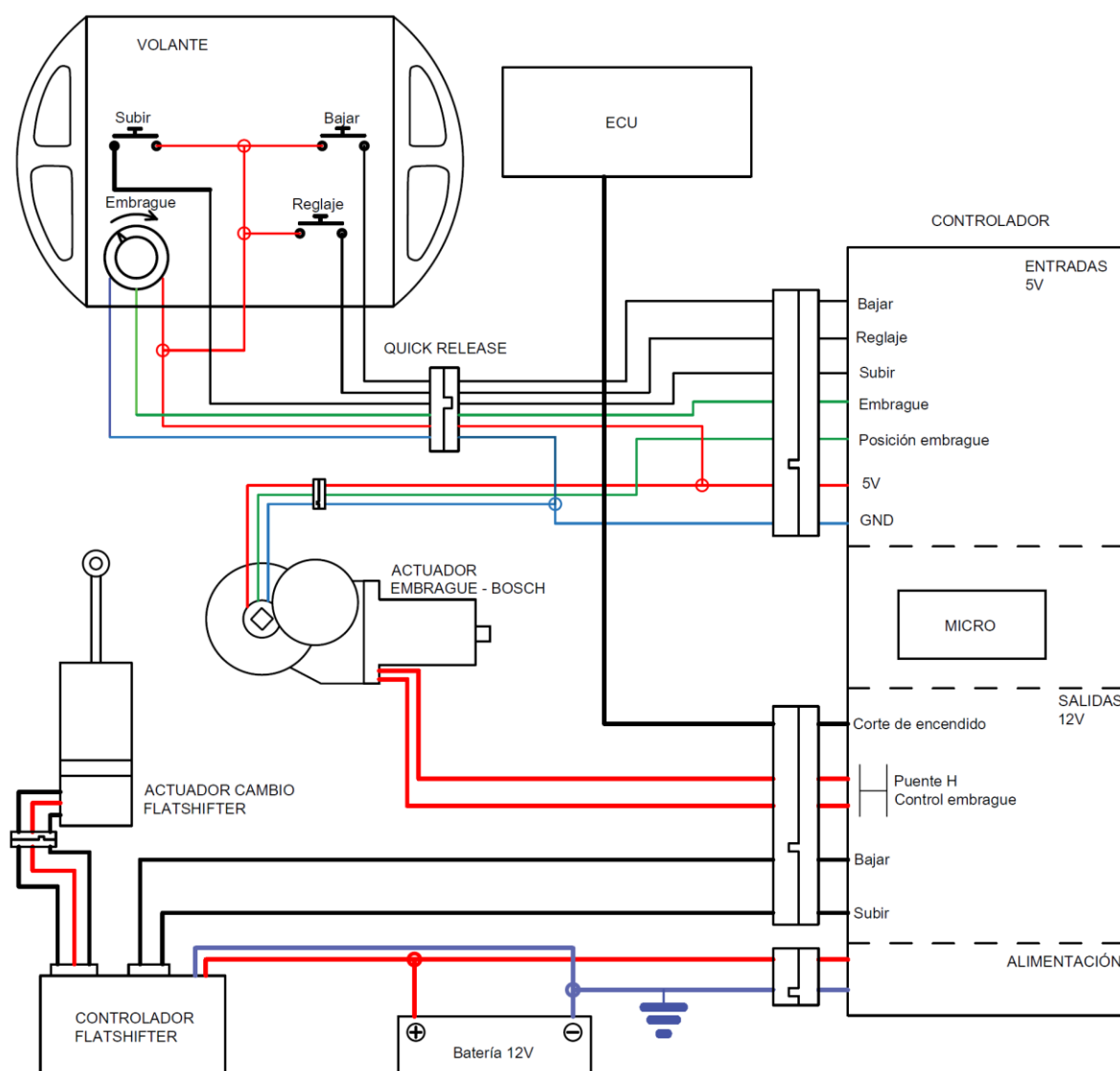


Figura 5.1 Esquema eléctrico general del sistema del cambio.

En la figura 5.1 se refleja el **esquema general de todo el sistema del cambio**. Este es el resultado de unificar los esquemas eléctricos de los capítulos 3 y 4 y añadirle detalles que no aparecían en ninguno de ellos (como el corte de encendido o los conectores). Un factor importante que se empieza a vislumbrar en esta figura es la **estructura interna del controlador**, teniendo por una parte las entradas, por otra el micro y por otra la parte de las salidas y alimentación de la placa. Otro aspecto de la figura 5.1 es que se observan **diferentes grosores de cables**, lo cual no indica que por ellos va a circular más o menos corriente, sino que el nivel de tensión al que van a trabajar será de 12V (líneas más gruesas) o 5V (líneas más finas). Las líneas que sí portan un **nivel de corriente significativo** ( $> 2A$  por ejemplo) son las de **alimentación** (procedentes de la batería) y las de **los actuadores**. Además se han representado también los **conectores aéreos** que habrá en el sistema ya que, aunque todas las conexiones se harán por medio de un conector, los fijos se encuentran incrustados en el elemento y por tanto es más complejo de representar esquemáticamente, como ocurre en el controlador del *Quickshifter* o el actuador del embrague. Realizando todas las conexiones a través de conectores se consigue que sea **mucho más sencillo el montaje o sustitución** de cualquier componente además de lograr un **mejor acabado**.

Aunque no se haya mencionado hasta ahora es necesario realizar una modificación en el montaje del *Quickshifter* respecto las indicaciones que da el fabricante. Si se consulta el *datasheet* [2] del sistema (o la figura 3.18) se observa que el fabricante indica que en la entrada de control del *Quickshifter* (desde la cual parten 3 cables) se conecten dos interruptores entre el cable común (12V) y cada uno de los otros dos. En esta aplicación esto no es válido ya que el controlador es el que **debe coordinar todo el sistema** y por tanto es necesario que tenga poder sobre el *Quickshifter*. La solución tomada es eliminar este cable común y darle la capacidad al controlador de asignar 12V a las líneas de control, tal y como se muestra en la figura 5.1. Así se consigue que nuestro controlador tenga un dominio total sobre el *Quickshifter*.

En cambio el **control del embrague** es sustancialmente diferente al del *Quickshifter*. Como ya se mencionó anteriormente es necesario embragar hasta una determinada posición, obtenida mediante el uso del sensor de posición o potenciómetro. Si no se empleara el sensor, únicamente se podría realizar un control a bucle abierto basado en tiempo, lo cual podría acabar acumulando deriva con el uso. Con el sensor de posición se consigue realizar un **control proporcional a lazo cerrado**. Además dado que el puente H es controlado por el microcontrolador no solo se podrá realizar el control de forma discreta, es decir, polarizando el puente H en un sentido u otro (embragar o desembragar) sino que también es posible el empleo de **una señal de PWM** para la activación del puente y por tanto conseguir obtener diferentes regímenes de trabajo. En la figura 5.2 se puede observar el **diagrama de bloques** del control proporcional del embrague para el caso discreto.

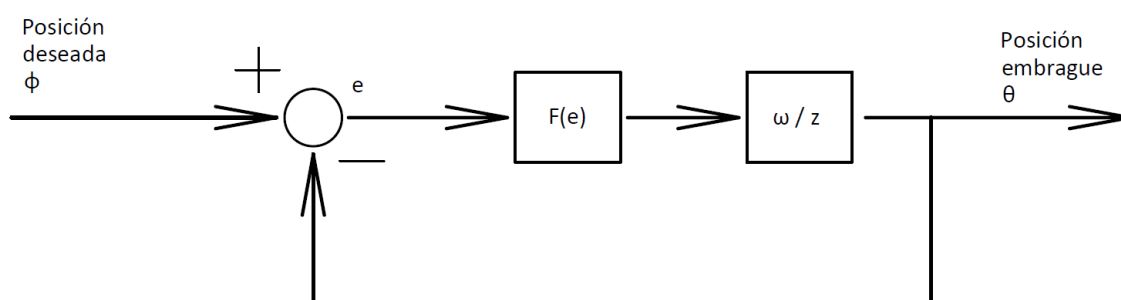


Figura 5.2 Diagrama de bloques del control del embrague

Donde  $F(e)$  es:

$$F(e) = \begin{cases} 1 & \text{si } e > 0 \\ -1 & \text{si } e < 0 \\ 0 & \text{si } e = 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

En el diagrama se observa cómo será el control, el embrague comenzará a girar en un sentido u otro (embragando o desembragando) en **función de la diferencia entre su posición actual y la deseada**. Este diagrama es aún genérico debido a que no se tienen datos de cómo será el comportamiento del sistema en trabajo y no se conoce como responderá el actuador a señales PWM con diferentes *duty cycles*. Por otra parte  $\omega$  representa la **velocidad**

**de giro** del actuador, la cual no será constante ya que depende de del par ejercido por el actuador, la posición en la que ese se encuentre, de si se está trabajando a favor o en contra de los muelles de embrague, etc. Por este motivo, dado que aún son desconocidos muchos parámetros, se presenta este modelo discreto en el que el actuador solo puede girar en un sentido o en otro en función de su posición y la deseada. Esta **posición deseada**<sup>11</sup> tendrá dos fuentes:

- **Definida vía software.** Esta definición se usará en los cambios realizados con el coche ya en marcha. Serán un **par de ángulos** (uno para subir y otro para bajar) a los cuales tendrá que llegar el embrague para que se produzca el cambio. Por la propia dinámica del motor estas dos posiciones no tienen por qué ser iguales ya que se necesita embragar mucho menos en subida que en bajada. Por tanto serán dos valores definidos en el *software* del controlador: **posición subida** y **posición bajada**. Estas posiciones serán determinadas durante la puesta a punto del cambio.
- **Directamente proporcional a la posición de leva del embrague.** Esta fuente se usará en la salida. En este caso la posición que debe alcanzar el embrague viene dada por la leva del embrague situada en el volante.

### 5.4.1 Coordinación

Tras conocer cómo será el funcionamiento del cambio y que es lo que se espera de él, llega el momento de conocer cómo se producirá la integración de los actuadores y como los coordinará el controlador para que el cambio se realice de la forma más óptima posible. El ajuste de los parámetros que intervienen en el control se realizará durante la **puesta a punto** del sistema una vez esté todo montado. El esquema de control completo se muestra en la figura 5.3 (a la izquierda entradas y a la derecha salidas). En él se observa que el controlador recibe las señales del piloto **de forma paralela** y opera con cada actuador **de forma paralela** igualmente (el corte de encendido puede considerarse como un actuador más), por tanto **la coordinación depende únicamente de él**. Para el caso de las entradas este tipo montaje es especialmente ventajoso debido a que en algunas situaciones el piloto accionará varias levas simultáneamente. En el caso de las salidas ocurre algo parecido, estando todas centralizadas en el controlador y funcionar de forma paralela.

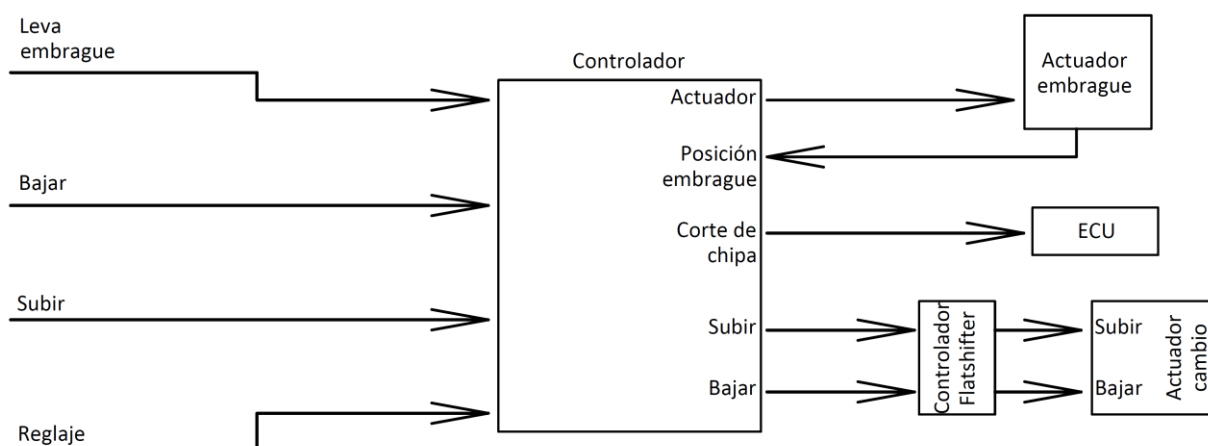


Figura 5.3 Diagrama de control completo

Otra característica que se plasma bien en la figura 5.3 es que el único elemento del sistema que tiene un **control a bucle cerrado es el embrague**. Tanto el **corte de chispa** como el **actuador del cambio** funcionan a bucle abierto y por tanto tendrán una respuesta característica ante un pulso de entrada que se determinará durante la puesta a punto. Por el contrario el corte de chispa, como ya se mencionó antes, se programa desde ECU para que este actúe de una forma u otra ante la misma señal de control.

<sup>11</sup> Cuando se habla de posiciones del embrague se refiere a un cierto ángulo respecto la posición en la que el cigüeñal y la caja de cambios se encuentran totalmente acoplados a través del embrague. El valor correspondiente que se le asigna es 0°, siendo la máxima posición 24°, tal y como se vio en el capítulo 2.

Una vez conocido el esquema general de control se pasa a trabajar con la **coordinación** de los actuadores. Las acciones que debe realizar el sistema del cambio se pueden englobar en **3 operaciones** diferentes:

1. **Subida (operación).** Operación que se da una vez puesto el coche en funcionamiento y cuyo objetivo es subir de marcha. Se parte del embrague en su posición inicial y el proceso comienza una vez que el piloto acciona la leva para subir (entrada) marcha. La primera parte es embragar hasta un determinado punto, al cual denominaremos como **posición de subida**. Durante el proceso de embragar es necesario que se produzca el corte de encendido para que el motor no se revolucione durante este periodo (esto permite al piloto subir de marcha sin levantar el pie del pedal del acelerador). Una vez alcanzada esta posición el actuador del cambio debe realizar el movimiento de subida (salida), el cual puede tener cierto retardo, e inmediatamente después el actuador del embrague tiene que empezar a desembragar hasta alcanzar la posición inicial. El tiempo que permanecerá activado el corte de encendido se determinará durante la puesta a punto.
2. **Bajada (operación).** Proceso similar a ojos del controlador pero opuesto físicamente. Al igual que la subida comienza cuando **el piloto acciona la leva de bajada**, partiendo del cigüeñal y la caja de transmisión acoplados en una determinada marcha y el coche moviéndose a una cierta velocidad. De nuevo en esta operación el controlador activa el actuador del embrague hasta que este alcance la denominada **posición de subida**. En este caso no se utiliza el corte de encendido pero sí puede ser necesario activar el actuador del cambio unos instantes (al igual que en el caso anterior) antes de alcanzar la posición de bajada (salida) de forma que este se efectúe en el mismo instante en el que el embrague logra la posición de subida. Una vez alcanzado el punto de bajada y metida la marcha el controlador activa el actuador del embrague en el sentido opuesto hasta alcanzar de nuevo la posición inicial.
3. **Subida o bajada (operaciones) con motor embragado.** En este caso partimos del embrague en una posición superior a la de subida y a la de bajada. Aquí es indiferente que el vehículo se encuentre en marcha o no, ya que se encuentra embragado. Para conseguir partir de un punto inicial superior a la posición de subida o a la de bajada (en función de si queremos subir o bajar) accionaremos la **leva del embrague**. Además encontrarse el motor embragado solo es necesario actuar sobre el cambio, por tanto, estando la leva del embrague accionada previamente el proceso comienza cuando el piloto acciona la leva de subir o de bajar (entradas) en función de lo que desee hacer. Una vez accionada ésta, el controlador solo tendrá que activar el actuador del cambio en el sentido correcto (salidas), el cual responderá pasado un cierto tiempo en función de su periodo de respuesta. Simultáneamente, durante todo el proceso, el actuador tendrá que **mantener la posición indicada por la leva del embrague**.

Serán configurados ahora unos cronogramas base que muestran de manera más visual el procedimiento de las operaciones de subida y de bajada. Los valores de tiempo son totalmente genéricos pero si tienen un orden de magnitud similar al que tendrá el sistema final.

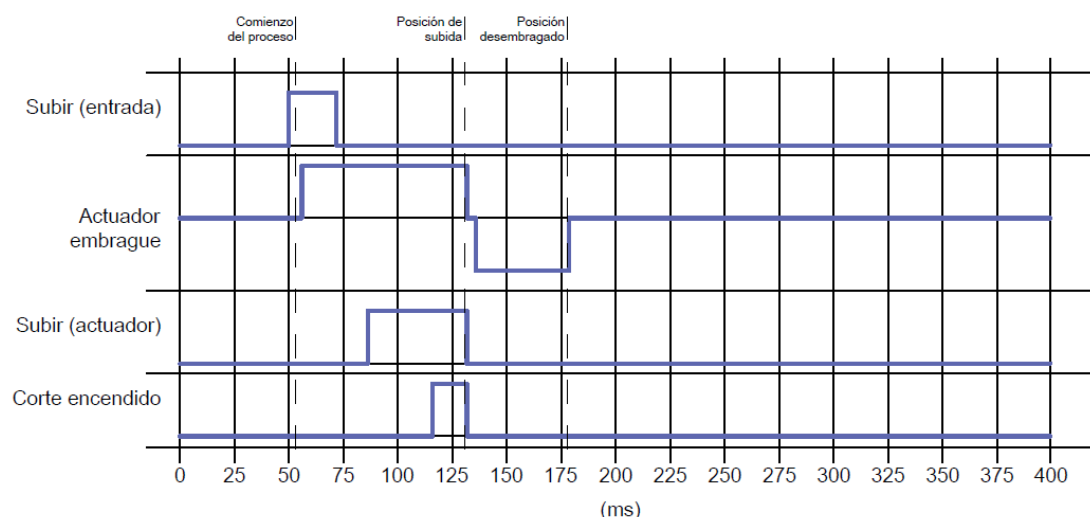


Figura 5.4 Cronograma genérico de la operación de subida



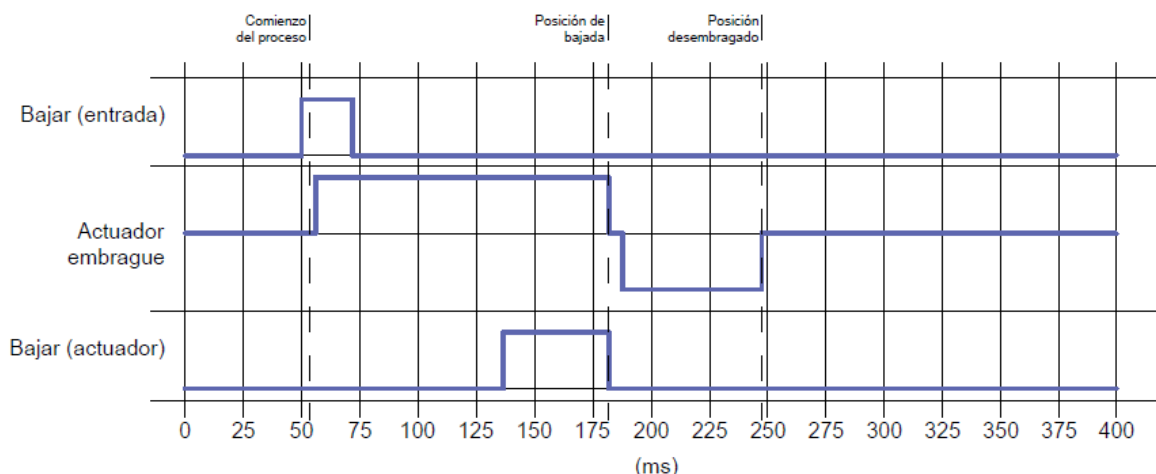


Figura 5.5 Cronograma genérico operación de bajada.

En la figura 5.4 y 5.5 quedan representados los cronogramas de subida y de bajada, ya que el de la tercera operación es muy similar a esto con la diferencia de que no es necesario embragar ni desembragar y tampoco realizar el corte de encendido.

Algo que salta a la vista en los cronogramas es la **diferencia de tiempo entre los procesos de embrague y desembrague**. Esto se ha realizado intencionadamente debido a que se puede anticipar que estos serán diferentes ya que cuando embraga el actuador debe comprimir los muelles de embrague y en el proceso inverso estos ayudan al actuador a realizar el movimiento.

Otro detalle importante que se ha plasmado en los cronogramas es la **diferencia entre el tiempo que está activado el actuador en subida y en bajada**. Esto se debe a la dinámica del motor y la diferencia entre los procesos de subida y de bajada. Durante una subida, el motor del vehículo se encuentra acelerando y por tanto es el cigüeñal el que arrastra a la caja de transmisión, ésta al diferencial y éste a su vez a las ruedas, por lo que este hecho unido a que el procedimiento conlleva una posterior reducción de las revoluciones del motor, hacen que no sea necesario el completo desacople del cigüeñal y la transmisión (de hecho, se puede llegar a realizar sin embragar en algunas situaciones). Combinando este proceso con el corte de encendido hace que en subida sea necesario embragar mucho menos que en bajada y que el cambio se pueda realizar manteniendo abierto el acelerador. Durante la puesta a punto se determinará cuanto es necesario embragar.

Por el contrario en bajada se da la situación contraria, el vehículo tiene inercia y por tanto son las ruedas las que mueven toda la transmisión y el cigüeñal. Además, esto unido a que un procedimiento de bajada provoca una fuerte subida de revoluciones, es necesario realizar un completo desacople de la transmisión y el cigüeñal para poder introducir la marcha. Adicionalmente, en este proceso cobra gran importancia el empleo de un **embrague antirrebote** que suaviza esta reducción y permite reducciones más suaves.

Se ha hecho alusión también en varias ocasiones al tiempo de retardo que tendrá el actuador del cambio. Es altamente probable que el actuador posea un cierto tiempo de respuesta y no reaccione inmediatamente una vez que recibe un pulso en su entrada. Aquí se ha supuesto que **no es despreciable** y que su **valor será constante siempre** (tanto en subida como en bajada). En la puesta a punto se determinará el valor de este, si es despreciable o no y si es o no constante.

## 5.5 PCB

Tras cuantificar y definir las funciones que debe realizar el controlador se pasa a su diseño. En la figura 5.1 se puede anticipar parte de su estructura: entradas por un lado, microcontrolador y salidas o parte de potencia.



Una aclaración que hay que realizar sobre el diseño del controlador que se muestra a continuación es que, como ya se ha mencionado, el objetivo de este sistema de cambio era ser implementado durante la temporada 2015/16 en el Formula Student de la Universidad de Sevilla, el ART-16, y ese año se decidió que tanto el control del sistema de cambio como el control del suministro eléctrico del coche fuesen **unidos en una misma PCB**. Por tanto el controlador que se muestra aquí se encontrará dentro de una PCB que incluye otros componentes ajenos a este sistema y a los que se hará mención únicamente en caso de que sea necesario. De cualquier modo, todo lo descrito en esta memoria sobre el controlador puede ser aplicado en una placa aparte y se tendría el mismo funcionamiento. El diseño de este sistema de suministro/control de la potencia eléctrica se encuentra en el proyecto de fin de grado de la Universidad de Sevilla “*Gestión del sistema eléctrico de un monoplaza*” [6].

Una vez hecha la aclaración se empezará con las **características básicas (o estructurales) de la PCB** donde irá insertado el controlador. Tras realizar diversas investigaciones sobre el diseño de PCB y elaborar varios prototipos en *protoboards* y programas de diseño se llegó a una placa con las siguientes características básicas:

- **Tensiones de funcionamiento de 12V y 5V.** En la placa convivirán al mismo tiempo tensiones de 5V y 12V referenciadas a la misma tierra o GND. Los 5V se emplearán en sensorización y señales de entrada al microcontrolador, mientras que los 12V para la alimentación de componentes y señales de control dirigidas a actuadores.
- **Tensión de alimentación de la placa de 12V.** Debido a que la única fuente de energía eléctrica que habrá en el monoplaza es la batería y esta será de 12V. Por tanto, un componente básico de la placa será un **convertidor de tensión** DC-DC de 12V a 5V. El seleccionado será el modelo TES 5-1211 de la marca **TRACO** [6].
- **4 capas.** Las dos exteriores con su correspondiente trazado de pistas y las dos interiores se corresponden con **dos planos**, uno con un nivel de tensión de 5V y otro con 0V correspondiente con tierra o GND. De esta forma se podrán obtener en cualquier punto de la placa estos valores de tensión simplemente trazando una vía hasta la capa correspondiente.
- **Espesores.** Un grosor estándar de pista de **35  $\mu\text{m}$  para las pistas de señal y 70  $\mu\text{m}$  para las de potencia**. Este es el valor máximo que ofrece el fabricante y generalmente, es el mayor que se presenta para fabricación industrial.

Conocidas las bases de la placa el siguiente paso es describir sus componentes y como se conectarán entre ellos. El primero de ellos ya ha sido introducido, el convertidor DC-DC de 12V a 5V.

Se describe ahora el elemento principal de la placa, el **microcontrolador**. Una vez más, existe un abanico enorme de modelos y fabricantes entre los que elegir. Finalmente el seleccionado fue el microcontrolador **ATMega328-P** del fabricante *Atmel* por similitud con el resto de PCBs del ART16, ya que dispone de capacidad suficiente para realizar el control. Sus características principales se observan en la tabla 5.1 y el resto podrán ser sacadas de su *datasheet* [7].

<b>Arquitectura</b>	8-bit AVR
<b>Memoria Flash</b>	32 kb
<b>RAM</b>	2 kb
<b>EEPROM</b>	1024 byte
<b>Número de pines</b>	32
<b>Max. Frecuencia</b>	20 MHz
<b>Canales ADC</b>	8 (10 bit – 15 ksp/s)
<b>Canales PWM</b>	6

Tabla 5.1 Características principales del ATMega 328P

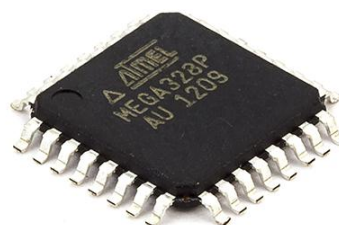


Figura 5.6 Fotografía del ATMega 328P

Otro dato importante de este microcontrolador es que ha sido desarrollado de acuerdo al estándar internacional ISO-TS-16949, el cual contiene una serie de requisitos de resistencia a temperatura, vibraciones, voltaje, etc. que lo certifica para **aplicaciones automovilísticas**. Además los microcontroladores pueden ser programados en diferentes entornos, quizás los más conocidos sean el propio de Atmel (*Atmel Studio*) y **Arduino**, ya que todos sus productos utilizan microcontroladores Atmel. Se fijará su frecuencia de reloj en **16 MHz** y la programación se realizará a través los **pines SPI** del ATmega, los cuales quedarán fácilmente accesibles desde el exterior de la placa mediante un conector.

El **SPI** (*Serial Peripheral Interface*) es un bus de comunicaciones que emplea un protocolo de comunicación serial y síncrono usado en transmisiones de corta distancia, desde el cual el ATmega puede ser programado. Este bus es del tipo **full dúplex** y usa **arquitectura maestro-esclavo** con un solo maestro. El SPI también es conocido como “*four-wire*” serial bus ya que lo integran 4 cables (*SCK*, *MOSI*, *MISO* y *RESET*) [8].

### 5.5.1 Entradas

Ya han sido enumeradas varias veces las entradas que llegarán al controlador, se describe a continuación como son procesadas hasta que finalmente son leídas por el micro. También se han mencionado los 2 tipos de entradas que hay: **digitales y analógicas**. Recapitulando las digitales son: **subir marcha, bajar marcha y la adicional o cambio de reglaje**; y las analógicas: **posición del embrague y posición de la leva del embrague**.

En primer lugar se va a hablar de **los requisitos** para cada una de las entradas. Como ya se ha anticipado algo común que es necesario a todas las entradas, sean analógicas o digitales, es **el nivel alto o 5V**, por tanto habrá que aportar estos desde el controlador. Se sacarán **dos líneas diferentes** de 5V, una dirigida al actuador del embrague y otra para todas las entradas situadas en el volante. Es importante que **todas las entradas estén referenciadas al mismo nivel alto** y este sea el mismo que el del microcontrolador para evitar que aparezcan errores por diferencia de tensión. A continuación se verán los requisitos específicos de cada tipo de entrada:

#### Analógicas:

- **Nivel bajo o GND.** Dado que ambas entradas analógicas son potenciómetros necesitan también de **una referencia nivel bajo o tierra** para funcionar correctamente. Por tanto, se requiere una toma de tierra en el controlador para sacar dos líneas (una para cada entrada analógica). Una vez más ésta vuelve a ser doble ya que una línea irá dirigida al actuador del embrague y otra al volante. Adicionalmente esta referencia puede ser trenzada con su correspondiente señal para disminuir así el ruido de esta. Al igual que ocurre con el nivel alto, vuelve a ser muy importante que el nivel bajo coincida para todas las entradas y para la placa.
- **Conexión a una entrada analógica del microcontrolador.** Las señales analógicas de los sensores no pueden ser conectadas a cualquier entrada del microcontrolador sino que solo pueden ser conectadas al puerto que contiene el **convertor analógico/digital** para que sean procesadas correctamente. Este es el puerto C [7].

#### Digitales:

- **Resistencia de pull-down.** Requisito que ya se vio en figuras anteriores. Debido a que la referencia la aportan los interruptores la única opción que nos queda es una resistencia de *pull-down*. El valor de esta será el mismo para todas las entradas digitales y de **10kΩ**. Al haber 3 entradas digitales serán necesarias 3 resistencias de 10kΩ, una para cada entrada.
- **Conexión a la patilla con la capacidad de interrupción configurable.** Una función que podrá ser interesante en la programación es la de **interrupción por periférico**. En resumen, esta es una función que contienen la mayoría de los microcontroladores que realiza una interrupción del código que esté ejecutando en ese momento, para ejecutar otro código asociado a dicha interrupción tras un cambio en una de sus entradas (de un nivel alto a un nivel bajo por ejemplo). Por otra parte esta capacidad no suelen tenerla todas los pines del microcontrolador y para el **ATmega328P** solo la poseen dos pines del puerto D: el **PD5** y el **PD6** [7]. Por tanto hay que conectarlas señales de **subir** y de **bajar** a estos pines por si fuese necesario configurar esta función para estos procesos.

Otro condicionante en la confección de la placa ha sido la reducción del ruido eléctrico. Una de los métodos ha sido el uso **ferritas** en todas las entradas (independientemente de que sean digitales o analógicas) justo antes de la llegada al micro. Con el empleo de las ferritas se consigue que las **altas frecuencias sean filtradas**. También se ha intentado **separar lo máximo posible** las entradas de la parte de potencia (o salidas), ya que estas son una fuente de interferencias, especialmente el puente H.

Alternativamente otra práctica que se puede realizar para reducir el ruido eléctrico de las señales analógicas es el empleo de un **filtro RC**<sup>12</sup> de paso bajo.

Por su parte para las digitales, como ya se ha mencionado en anteriores ocasiones, son bastante robustas al ruido y no se aplicará ningún método más de atenuación de este.

### 5.5.2 Salidas

Toca ahora continuar con la parte de salidas o **de potencia** donde el principal condicionante es el **control de los 12V con señales de 5V**. El micro funciona a 5V y por tanto las señales que genera tendrán como máximo nivel tensión estos 5V y solo se podrán alimentar elementos de muy baja intensidad (por ejemplo un LED), por lo que es inviable controlar todos los actuadores del sistema de cambio (que funcionan a 12V y algunos de ellos requieren cierta intensidad de corriente) sin una **etapa de potencia**.

Se puede afirmar que habrá **dos situaciones** diferentes en los que es necesario realizar el paso de los 5V a los 12V. La primera de ellas más **sencilla**, en el que solo se debe **controlar mediante una señal de 5V otra señal (de control o de alimentación) de 12V**. Por su parte la segunda, la cual se puede considerar una evolución de esta, no solo requiere el control de 12V con 5V sino que es necesario controlar un puente H cuya salida debe ser estos 12V

El **otro condicionante** de esta parte de potencia es que debido a cómo está constituido el sistema eléctrico del coche, la **activación de la alimentación de un cierto componente o de las señales de 12V debe realizarse mediante nivel alto** [6], ya que en caso contrario podrían aparecer transitorios indeseados en situaciones de arranque.

Para llegar a una solución a este problema se ha empleado el **software PSPICE** [16]. Este programa permite la simulación de circuitos electrónicos de toda clase, aunque no es posible la introducción del microcontrolador, por lo que habrá que modelar éste con una fuente de DC y una resistencia de *pull-down* para los niveles alto y bajo respectivamente. En las figuras 5.7 y 5.8 es posible ver implícitamente como quedaría este modelo y el resultado que se obtendría en una simulación de 10 segundos de duración, respectivamente.

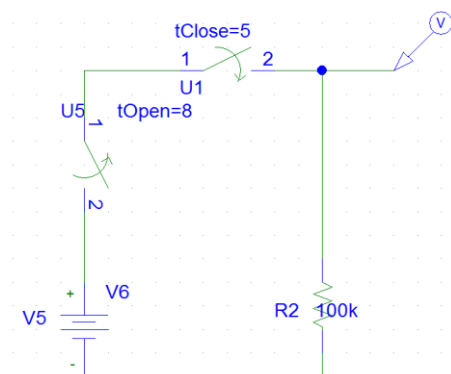


Figura 5.7 Modelado de la señal del microcontrolador en PSPICE

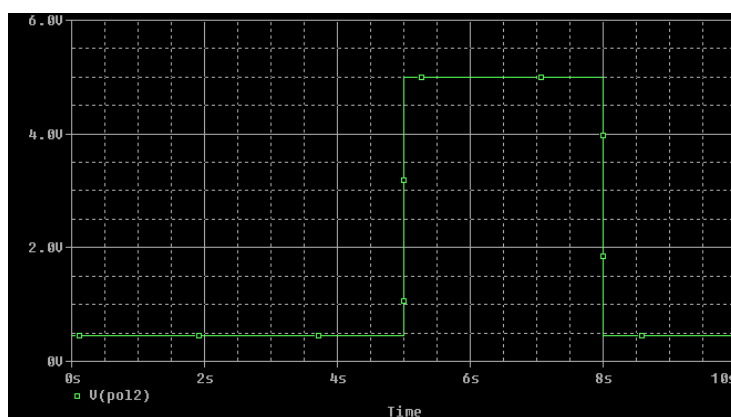


Figura 5.8 Simulación 10s de un pulso rectangular generado por el modelo del microcontrolador en PSPICE

<sup>12</sup> Un filtro RC paso bajo es un circuito formado por una resistencia y un condensador conectados en serie. Este circuito permite el paso de frecuencias por debajo de una de una frecuencia particular llamada frecuencia de corte y elimina las frecuencias por encima de esta.



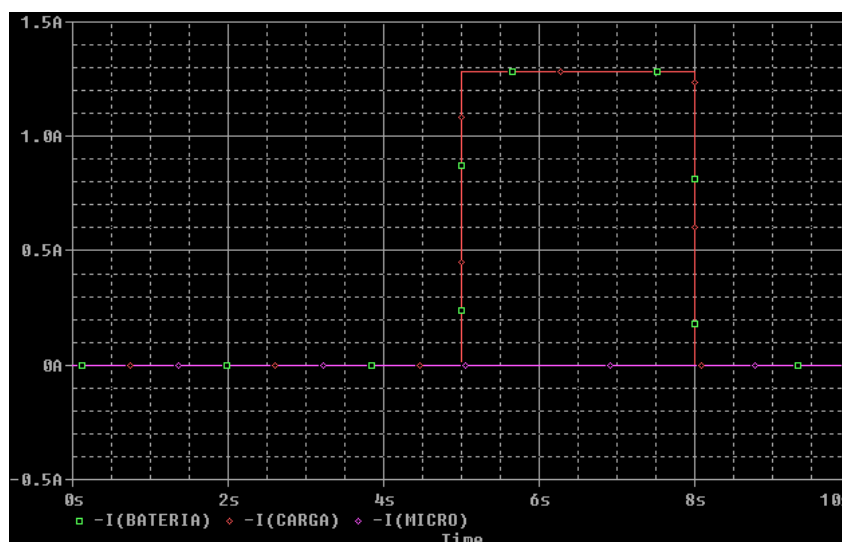


Figura 5.11 Evolución de la intensidad en dos puntos críticos de la simulación de la figura 5.9

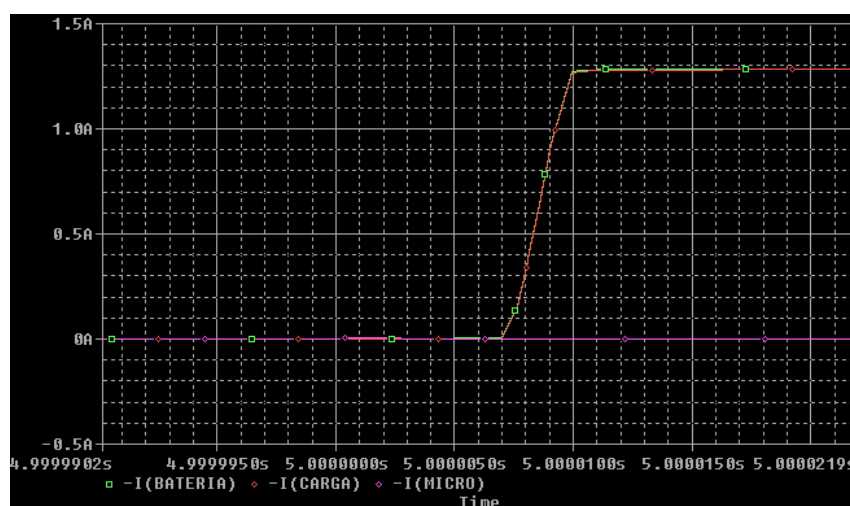


Figura 5.12 Transitorio de apertura de la celdilla básica de la simulación de la figura 5.9

El funcionamiento del montaje se puede deducir de la figura 5.9: en primer lugar la señal del micro llega hasta la puerta del transistor *n-channel* donde provoca la apertura de transistor y por tanto la continuidad entre el drenador y la fuente (existirá una pequeña caída de tensión). Esto hará que en la puerta del *p-channel* aparezca un nivel de tensión próximo a los 0V que producirá una diferencia de tensión  $V_{SG} > V_{th}$ <sup>13</sup> (ya que  $V_{SG}$  es próximo a 12V) que **hará que el transistor entre en saturación** y por tanto llegarán los 12V a la carga [9]. Se puede observar en las figuras 5.10 y 5.11 como este montaje tiene unos tiempos de respuesta mínimos y próximos a los de los transistores.

También es posible comprobar que **el transistor por el que circulará el grueso de corriente será el *p-channel***. Además existirá siempre una pequeña caída de tensión entre el drenador y la fuente de dicho transistor en función del modelo de transistor seleccionado. En las figuras 5.10 y 5.11 se observa como el funcionamiento de la celdilla es el deseado y se obtienen unos tiempos de respuesta mucho inferiores a cualquiera de los tiempos característicos de cualquiera de los actuadores (observar cronogramas de la las figuras 5.4 y 5.5). Este tiempo de respuesta se muestra con más precisión en la figura 5.12, que no es más que una ampliación de detalle de la 5.11. PSPICE predice un tiempo de apertura de aproximadamente **10  $\mu$ s** (figura 5.12).

Notar también que se ha añadido una resistencia de *pull-down* (en la figura 5.9 “*pulldown2*”) debido a que es desconocida el tipo de impedancia que tiene el microcontrolador entre el pin y tierra, pero es necesario **forzar** que exista esta resistencia de *pull-down* en cualquier caso para el correcto funcionamiento de la celda [10].

<sup>13</sup>  $V_{th}$  es el denominado voltaje de umbral (*threshold* en inglés). Se define como el voltaje puerta-fuente para el cual se forma el canal. Su valor se controla durante la fabricación y suele estar entre 0.5V a 2V [9]

Como se refleja en la figura 5.9 en el diseño se han empleado los transistores **IRF150** y **IRF914** aunque en el controlador se usaran el **IRF4905** (como *p-channel*) y el **IRFZ44N** (como *n-channel*) que también son del fabricante **International Rectifier** pero soportan una **mayor intensidad drenador-fuente**. Ambos transistores tienen el encapsulado (o *package*) **TO-220** y serán montados de forma vertical. Toda la información referente a ellos se encuentra en los *datasheets* proporcionados por el fabricante [10] [11].

Esta celdilla básica se empleará para **las salidas de subir, bajar y corte de encendido**, siendo cada una de ellas activada por una salida digital procedente de micro. Este montaje también **permite un funcionamiento PWM** siempre que el pin del microcontrolador al que esté conectada la celdilla tenga esta función (en nuestro caso la tienen todos los de control del micro). Por último, la única salida que requiere **un requisito adicional** a la celdilla básica es la del corte de encendido, que al ser a su vez una entrada digital de la ECU del monoplaza necesita siempre tener un nivel de tensión lógico en su entrada, esto es 0V (nivel bajo) o 12V (nivel alto) para su correcto funcionamiento tal y como indica su manual [13]. Esto se consigue colocando **una resistencia de pull-down en la salida de la celdilla básica**, y de esta forma la ECU tendrá continuamente un nivel bajo en su entrada hasta el momento que tenga que realizar el corte de encendido que tendrá un nivel alto.

Se llega ahora a la segunda situación, **el puente H**. El **punto de partida es similar al anterior**: el actuador del embrague necesita 12V para su funcionamiento, se desea realizar el control mediante semiconductores (por las ventajas ya enumeradas), la señal de activación procedente de microcontrolador es de 5V, etc., pero con el problema añadido de que todo ello debe quedar dentro de un puente H para poder controlar el sentido de giro del actuador del embrague. De nuevo se vuelve a utilizar PSPICE y será modelado el micro de forma similar al caso anterior.

La **solución**, una vez más es alcanzada realizando varias iteraciones hasta llegar al resultado de la figura 5.13. En este caso son necesarios 6 transistores: **4 n-channel y 2 p-channel** formando 2 celdillas básicas junto con un *n-channel* adicional por cada celdilla básica para completar así cada rama del puente H.

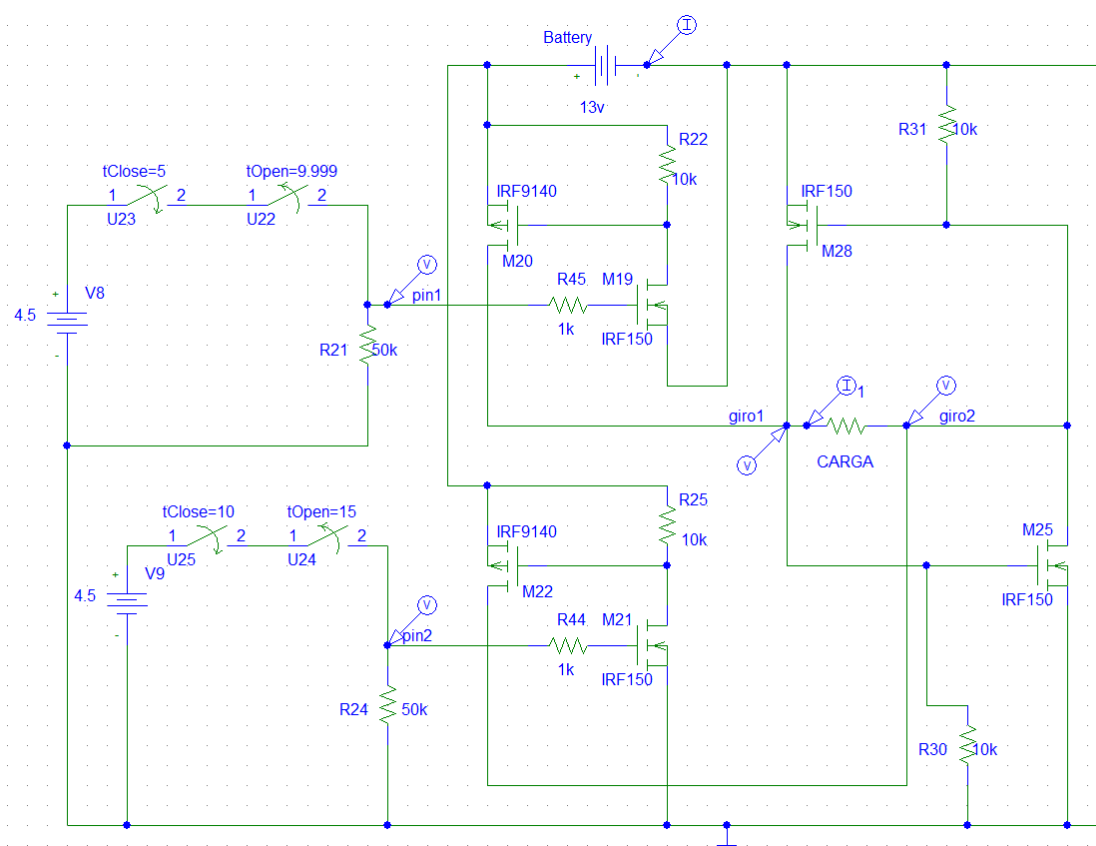


Figura 5.13 Puente H para el control del actuador del embrague

En la figura 5.13 es posible observar como el control de puente H requiere dos pines del microcontrolador cuya combinación de resultados posibles se explica en la tabla 5.2. Estos pines serán el **PD2** y el **PD3** (del puerto D) del microcontrolador debido a que, aunque estos pueden ser seleccionados de forma arbitraria, se ha buscado un buen posicionamiento de cara al enrutado de la placa [7].

PIN PD2	PIN PD3	RESULTADO
0	0	Puente H desactivado y por tanto el actuador no gira en ningún sentido.
1	0	El actuador gira en el sentido de giro asignado a dicho pin.
0	1	El actuador gira en el sentido de giro asignado a dicho pin.
1	1	Provocaría un cortocircuito en la placa por tanto debe evitarse este resultado siempre vía software

Tabla 5.2 Casuística de los pines del microcontrolador

En la figura 5.13 se han colocado sensores de voltaje e intensidad en los puntos más interesantes del sistema. El resultado de las medidas que toman estos sensores durante una simulación de 20 segundos del circuito de dicha figura se muestra en las figuras 5.14 y 5.15.

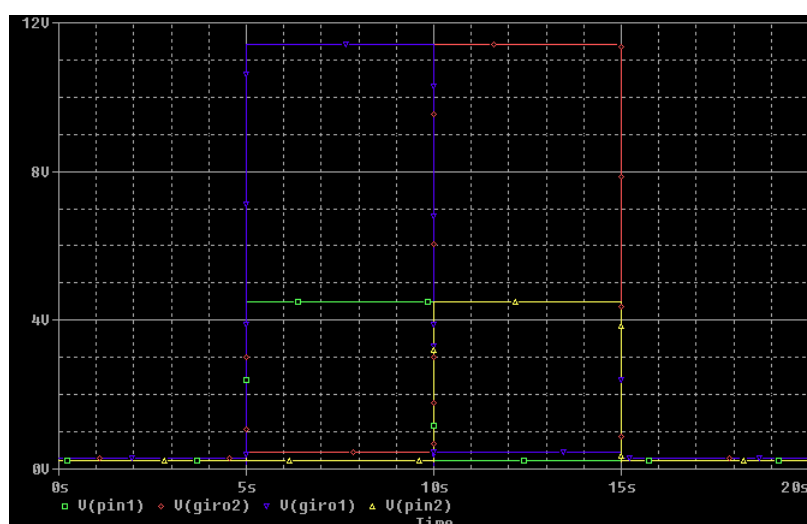


Figura 5.14 Tensiones resultantes de la simulación de la figura 5.13

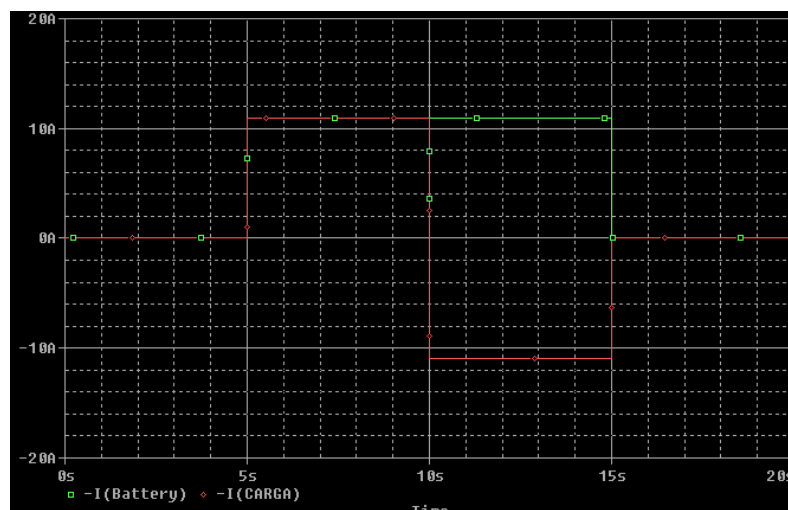


Figura 5.15 Intensidad resultante de la simulación de la figura 5.13



Como se puede observar en las figuras 5.14 y 5.15 el funcionamiento del puente H satisface las necesidades del sistema. En las simulaciones se ha tomado como tiempo de conmutación entre un sentido y otro **1  $\mu$ s**. El **funcionamiento** se basa en el de la celdilla básica ya que cada uno de los pines activa únicamente una de ellas y mediante la circuitería interna del puente se activará el sentido en un giro u otro. Una vez que el pin se activa, la celdilla básica se activa y el drenador del transistor *p-channel* de la celdilla pasa a tener un nivel de tensión próximo a 12V (entra en el estado de saturación). El drenador está conectado a su vez a la puerta del **transistor *n-channel* de otra rama** del puente H lo que provoca que **este entre en saturación también** (en este caso  $V_{SG} > V_{th}$ ) cerrando el circuito y activando el giro en uno de los sentidos. Mientras tanto, la otra celdilla y el otro transistor *n-channel* permanecen **en corte** y para accionarlos habría que poner en nivel alto el otro pin del microcontrolador.

Al igual que en la celdilla básica los transistores seleccionados serán el **IRF4905** y el **IRFZ44N**, ambos con el encapsulado **TO-220** y **montaje vertical** en la placa. En este caso 2 de los transistores *n-channel* (los que no pertenecen a las celdillas básicas) si deben **soportar un cierto nivel de corriente** pero estos están preparados para ello, tal y como se puede consultar en los *datasheets* de ambos transistores [10] [11].

El análisis en voltaje de la figura 5.14 no predice un comportamiento totalmente "ideal" ya que se observan picos de tensión en los cambios de un sentido a otro o de estático a cualquiera de los dos sentidos. La figura 5.16 se ha colocado con el propósito de ejemplificar estos comportamientos y no es más que una ampliación del comienzo de giro en el sentido de giro "1" de la figura 5.14. Es algo que se tiene que asumir y cuyos efectos quedarán pendientes de evaluar una vez se fabriquen los prototipos. En cualquier caso los valores máximos que predice PSPICE son muy inferiores a los valores límites de los transistores y del resto de componentes del circuito. Por otra parte, el análisis en intensidad si predice un comportamiento bastante limpio e ideal. Debido a este resultado y a que las tensiones máximas que predice PSPICE son muy inferiores a la de alimentación se puede asegurar que si en realidad se diese un comportamiento como este o similar, **el actuador nunca resultaría dañado**.

Otro detalle notable que se observa en la figura 5.14 es que existe una **mayor diferencia de tensión entre la tensión que recibe la carga y la de la batería** comparando con el caso de la celdilla básica. Esto se debe a que en este caso el circuito por el que circula la corriente eléctrica que alimenta al actuador debe pasar por dos transistores, por lo que hay el doble de caída de tensión que en el caso anterior. Además este fenómeno es algo inevitable ya que cualquier puente H sigue esta estructura y los transistores siempre tienen una cierta caída de tensión drenador-fuente. Por otra parte los transistores que se usarán en la realidad tienen una **menor caída de tensión drenador-fuente** que los utilizados en esta etapa de diseño por lo que ésta no será tan notable en el circuito real. Lógicamente esto también tiene un efecto sobre la corriente tal y como se ve en la figura 5.15.

También es importante remarcar, a la vista de los resultados obtenidos tanto para la celdilla básica como para el puente H, la rápida respuesta que tienen la apertura y cierre de estos será una **fuerte fuente de ruido** cuya principal víctima serán las señales analógicas de entrada, como ya se anticipó. Para disminuir este ruido se aplicaran los métodos ya comentados (trenzado, separación dentro de la placa...) más otros adicionales que se explicarán en los siguientes apartados.

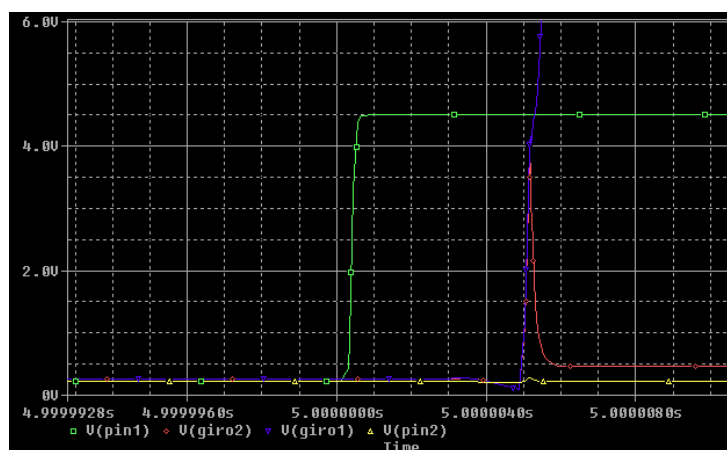


Figura 5.16 Voltajes en el comienzo de giro en el sentido 1



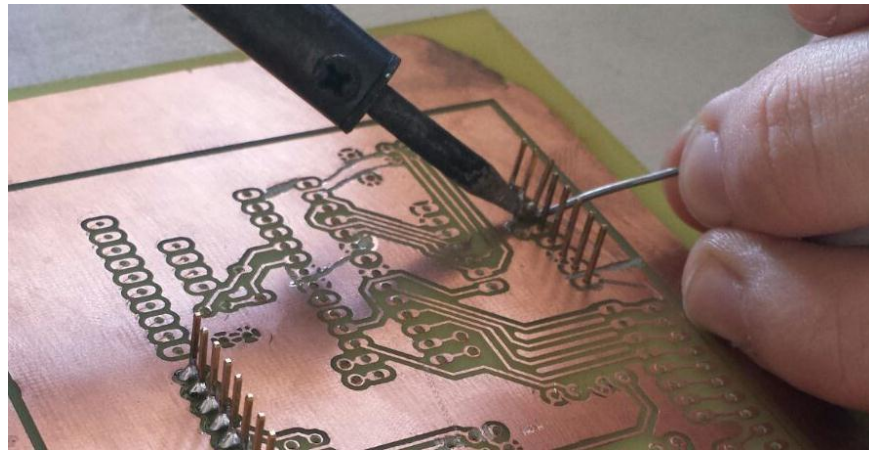


Figura 5.17 Fotografía durante el montaje de un prototipo

En este apartado se ha basado el diseño únicamente en modelos y simulaciones con el *software* PSPICE. Esto no fue exactamente así debido a que en el diseño de las salidas **se emplearon prototipos similares** a los del programa para comprobar que lo que predecía este se daría en la realidad. En estos prototipos se utilizaron *protoboards*, placas programables Arduino, transistores IRF4905 e IRFZ44N y cargas como el propio actuador de embrague o un simple LED.

### 5.5.3 PCB final

Una vez conocidos todos las partes y subsistemas del controlador por separado es el momento de ponerlo todo en conjunto y **realizar el diseño de la PCB**. Para el diseño de la misma se ha empleado el *software* Eagle [20], el cual está dirigido al diseño de PCBs.

El primer paso para el diseño de la PCB es la elaboración de lo que es conocido como “**esquemático**”, que no es más que el **esquema eléctrico** del circuito que posteriormente irá impreso en la PCB. Para ello Eagle cuenta con un entorno preparado para la elaboración del mismo y una **amplia librería** con la mayoría de los componentes necesarios. En el caso de no tener alguno, estos pueden ser fácilmente modelados o importados.

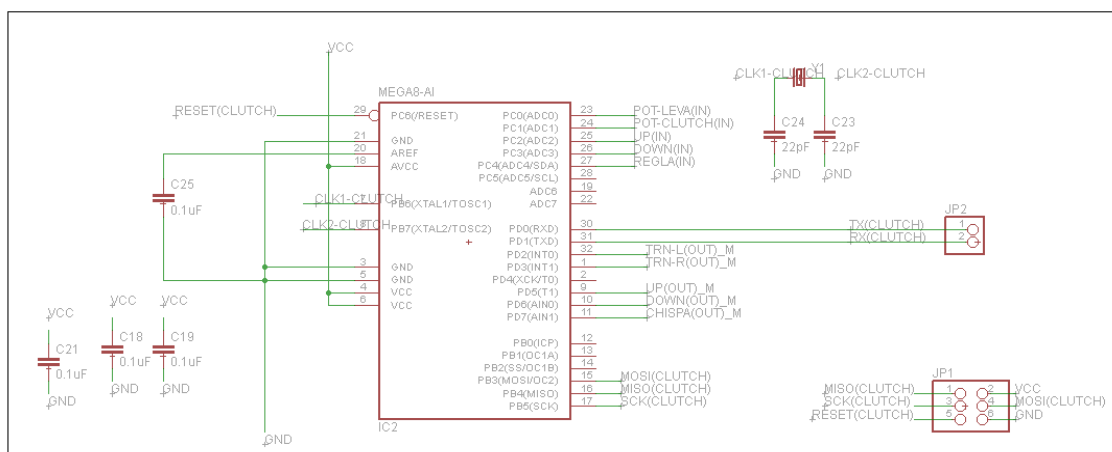


Figura 5.18 Parte del esquemático de la PCB: microcontrolador y conectores de comunicación



- **Sensor de intensidad.** Es un dispositivo semiconductor que genera un voltaje proporcional a la intensidad que circula por él. Este elemento será utilizado por la parte de potencia para monitorizar el consumo eléctrico del sistema del cambio y detectar si ocurre algún fallo en el sistema. El nombre del componente es: **ACS712 y el encapsulado SOIC8**.
- **Ferritas.** Como ya se ha visto habrá **componentes emisores de ruido** (altas frecuencias en la zona del microcontrolador, intensidades elevadas en la zona de salidas) y **señales muy susceptibles a este** (señales analógicas) conviviendo en un **reducido espacio de placa**. Un método utilizado en placas con planos de tierra o de alimentación (como es nuestro caso) para la atenuación de estas interferencias es el conocido como “**microisla**” (*moat*), que consiste en separar unos sectores de otros en todos los niveles (tanto pistas como los planos). De este modo los planos quedan separados unos de otro igual que si se tratasen de diferentes “islas” las cuales se conectan unas con otras mediante **núcleos de ferritas**, que actúan como **filtros paso bajo**. Del mismo modo, a las pistas que pasen por estos puntos en los que se produce la partición de un plano con su adyacente también se le colocan ferritas de forma que estas también filtren la señal que viajan por la pista. Con este método se consigue **reducir las interferencias** de unos sectores de la placa con otros y **reducir el ruido de alta frecuencia** de las pistas [12].
- **Pines para jumpers.** Estos serán ocho, seis para el bus de comunicación SPI y dos para el I2C. Como ya fue dicho el SPI se empleará para la programación del micro. El I2C no tiene ninguna función definida a priori pero podría ser útil en el futuro y darle una mayor versatilidad a la placa.
- **Porta fusibles.** Uno en cada salida, de forma que si se produce algún cortocircuito el fusible se funda y no dañe la placa.
- **Orificios para cables.** Todos los cables que conectan la placa con el resto del vehículo van soldados a estas en orificios *through hole* que están unidos a la pista correspondiente.
- **Filtros RC.** Como ya se mencionó anteriormente existía la posibilidad de usar un filtro RC para señales analógicas. En el dimensionamiento de estos se ha tomado como tiempo característico mínimo de ambas señales **20 ms** y los filtros RC se han dimensionado aproximadamente (en función de los valores comerciales) para tener una frecuencia de corte aproximadamente **10 veces superior** a la frecuencia asociada a dicho tiempo característico (ecuaciones 5.2 y 5.3). El valor de los condensadores es de **220 nF** y el de las **resistencias de 1k**.

$$F_{SEÑAL} = \frac{1}{20ms} = 50Hz \quad (5.2)$$

$$F_{CORTE} = \frac{1}{2*\pi*RC} = 723.43Hz \quad (5.3)$$

Antes de pasar a la construcción de la placa cabe destacar que **lo verdaderamente importante es el encapsulado** del elemento, de forma que su **huella**<sup>14</sup> sea luego la misma del componente que se desea usar. Esto es muy frecuente en el caso de las resistencias, donde a la hora de generar el esquemático se selecciona un determinado encapsulado de resistencia, no un valor, asegurando siempre de que existe comercialmente una resistencia con esa misma huella y el valor que se requiere. Adicionalmente el programa te permite darle valor el cual es irrelevante para la construcción de la placa, únicamente tiene un propósito visual.

Una vez concluido el esquemático hay que pasar al otro entorno de Eagle donde se realiza la construcción de la placa: “*board*”. El esquemático es importado a este nuevo entorno donde los elementos aquí ya no aparecen representados por su símbolo eléctrico, sino por su huella. Hay que recordar que el controlador del sistema del cambio se diseñó en la misma placa que el sistema de control de potencia eléctrica del monoplaza, por lo que habrá partes que no corresponden a esta memoria y partes que serán comunes a ambos sistemas [6].

Lo primero aquí (antes de empezar lo que se conoce como “enrutado”, del inglés *routing*) es definir unos parámetros básicos: tamaño de la placa que se va a construir, número de capas, ancho mínimo de vía, separación mínima de pistas, espesor de pista, etc. Todo ello constituye el **DRC** de nuestra placa que no es más que **un conjunto de reglas de diseño** que se deben cumplimentar y de las cuales la mayoría son dadas por el fabricante (o en su defecto este nos proporciona unos márgenes dentro de los cuales se pueden elegir diferentes

<sup>14</sup> La huella de un componente electrónica es la proyección vertical de su encapsulado o *package*, especialmente de sus pines o zonas de conexión de forma que imprimiendo esta huella en una PCB dicho componente puede ser conectado correctamente a dicha placa.

configuraciones). Estos valores han sido configurados por la parte del control de la potencia eléctrica de la placa [6] y algunos de ellos ya han sido mencionados cuando se enumeraron las características básicas de la PCB. Una de las características del DRC configurado es que todas las vías son pasantes, es decir, no es posible hacer vías ciegas hasta la capa deseada ya que el fabricante no realiza este tipo de vías.

Una vez definido el DRC ya se puede comenzar con el enrutado de la placa. Este proceso consiste en **dos funciones básicas: colación y conexión** de todos los elementos de la placa de manera que no aparezca ninguna interferencia entre ninguna pista, vía, o dispositivo. Es un proceso laborioso que requiere de un elevado número de horas para dar con **una solución compacta y bien organizada**. A continuación en las figuras 5.22, 5.23 y 5.24 se muestra la solución alcanzada para la placa completa, es decir, tanto para el sistema del cambio como para el control de la potencia. La separación entre una parte y la otra se ve con más claridad en la figura 5.22, donde la parte dedicada al control del embrague se encuentra delimitada **por el recuadro amarillo**.

En la figura 5.22 se muestran las capas superior e inferior, la figura 5.23 el plano de 5V o VCC y en la figura 5.24 el plano de tierra o GND. Se muestran de este modo debido a que al estar todo superpuesto, las capas superiores impedirían ver las inferiores. La disposición de los componentes en la placa es la ya anticipada en figuras anteriores:

- En la parte superior se encuentra **las entradas**, las cuales están formadas por 5 orificios donde se soldarán los cables de estas, las **resistencias pull-down** ya mencionadas y dos **filtros RC** para cada una de las entradas analógicas. Esta zona se puede observar más en detalle en la figura 5.25. Antes de llegar a la zona del micro todas las entradas pasarán por ferritas que están colocadas justo en la partición de los planos de VCC y GND.
- El componente más voluminoso (situado arriba a derecha) es el convertidor de 12V a 5V. Este es usado tanto por la parte del control del cambio como por la parte de control de la potencia eléctrica.
- La "isla" del micro. Como ya se mencionó la zona de la PCB donde se encuentra el microcontrolador y sus auxiliares (reloj, pines para el SPI y el I2C, resistencias y condensadores) se encuentra semi-aislada del resto la placa debido a que todas las conexiones de esta con el exterior se realizan a través de ferritas. Esto es aplicable a todos los niveles, es decir, se aplica tanto a las pistas de las capas exterior e inferior como a los planos VCC y GND. También es importante destacar aquí que es necesario con algunos dispositivos eliminar la proyección de la huella de estos sobre alguno de los planos, como por ejemplo con el reloj, al ser el elemento que funciona a más frecuencia de la placa este transmitiría interferencias a dichos planos y por eso, tal y como se ve en las figura 5.23 y 5.24, ambos son recortados en esta zona.
- **Salidas de control (subir, bajar y corte de encendido o de chispa)**. En esta zona es importante remarcar como se produce un considerable ensanchamiento de las pistas ya que estas funcionan a 12V y podrían llegar a portar más intensidad (las señales de control no especialmente, pero sí las del puente H). También se han añadido portafusibles a cada una de las salidas debido a que si se produjese un cortocircuito no se dañase ningún transistor ni ninguna pista. El valor de los transistores para estas señales de control es de 5A.
- **Puente H**. Formado por los 6 transistores MOSFETs y sus respectivas resistencias. De nuevo las pistas por donde circulará la corriente que alimentará al actuador son aún más anchas para evitar el calentamiento de estas o que lleguen a quemarse. Con el fin de que esto no llegue a ocurrir y ni que tampoco los transistores resulten dañados se colocan unos portafusibles al igual que en las salidas de control. En este caso el fusible colocado será de 20 A.

Los componentes auxiliares que requiere cada dispositivo (como el reloj, micro o convertidor de 12V a 5V) se sacan de los respectivos *datasheets*. Además de estos componentes en la placa existen otros elementos fundamentales para el funcionamiento como son las tomas de 12V y GND directamente procedentes de los bornes de la batería. Se puede apreciar cómo estos orificios son mucho mayores que los de las entradas o salidas debidos a que por ellos circulará toda la intensidad del monopolazo [6].

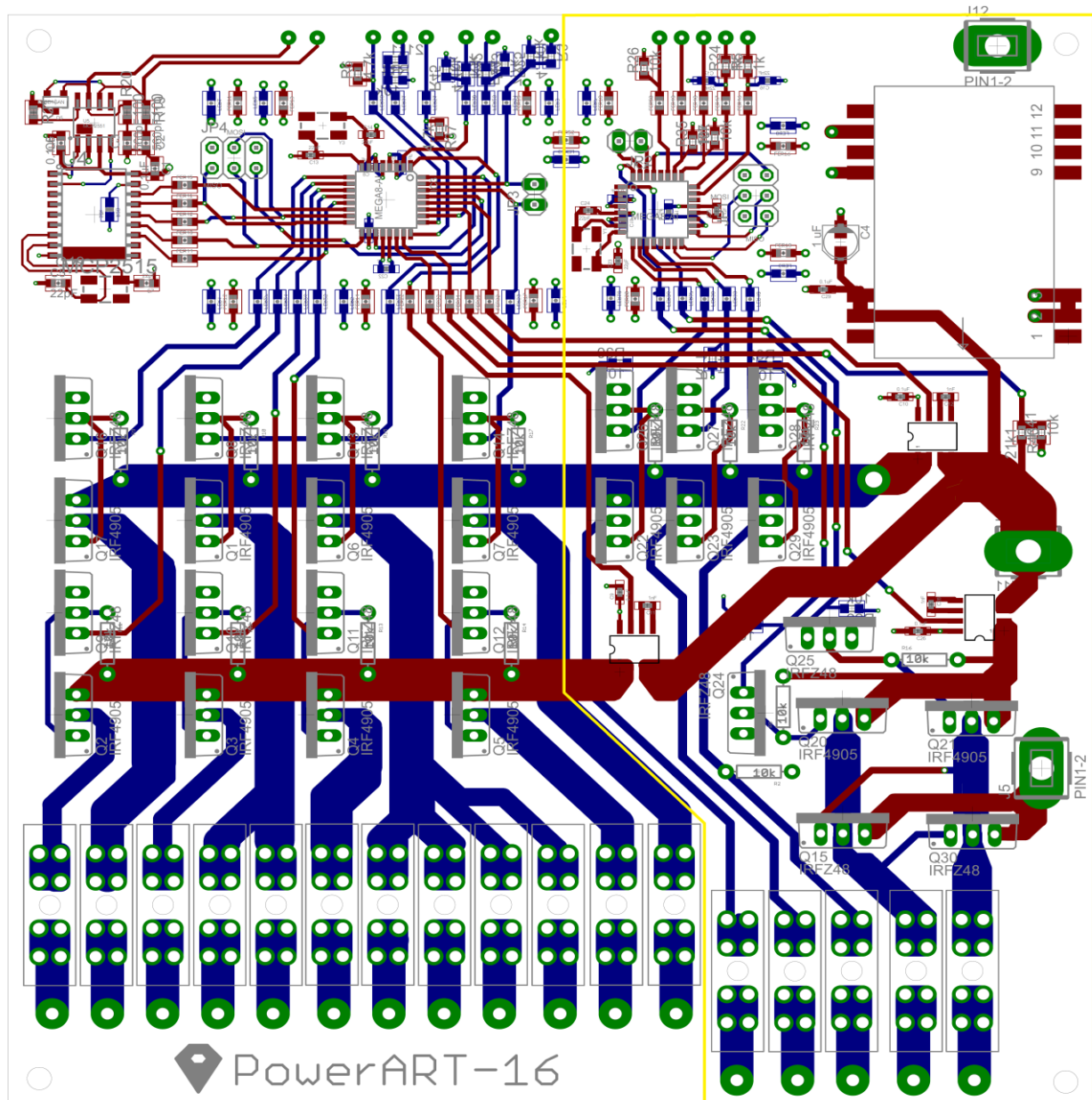


Figura 5.22 Capas superior e inferior de la PCB

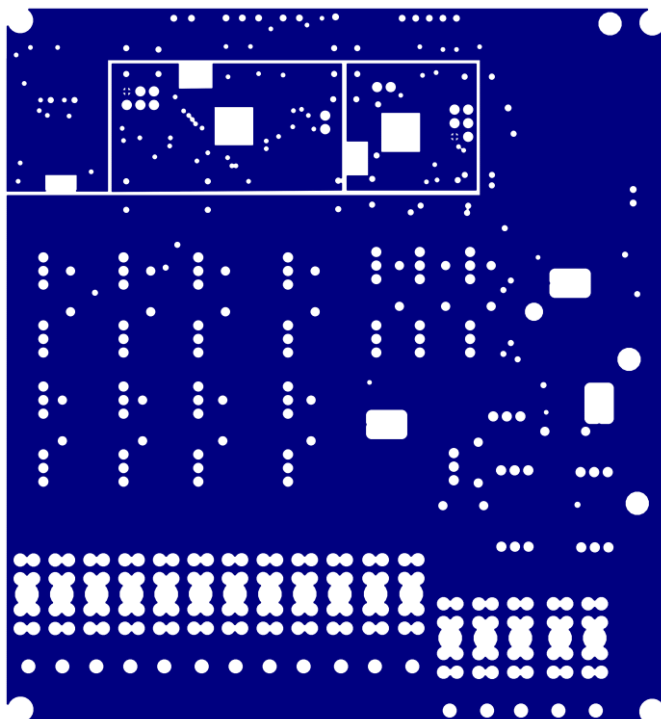


Figura 5.23 Capa VCC de la PCB

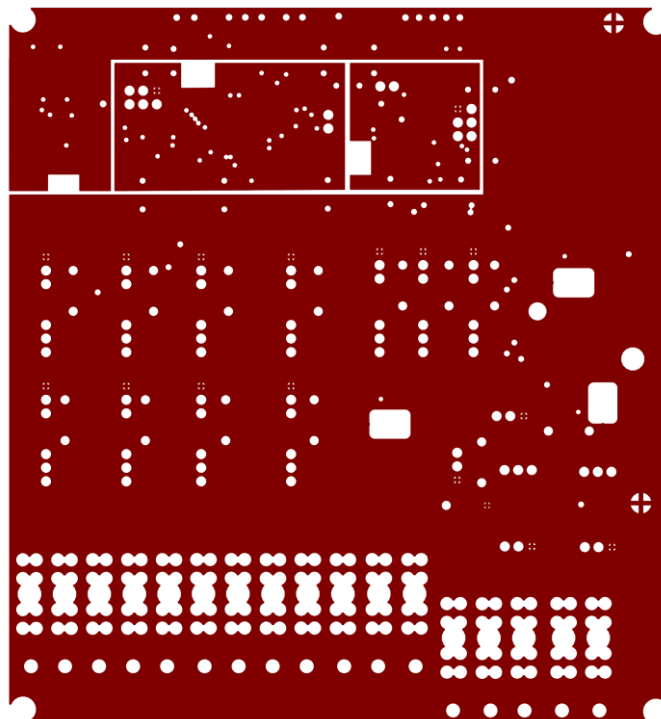


Figura 5.24 Capa GND de la PCB

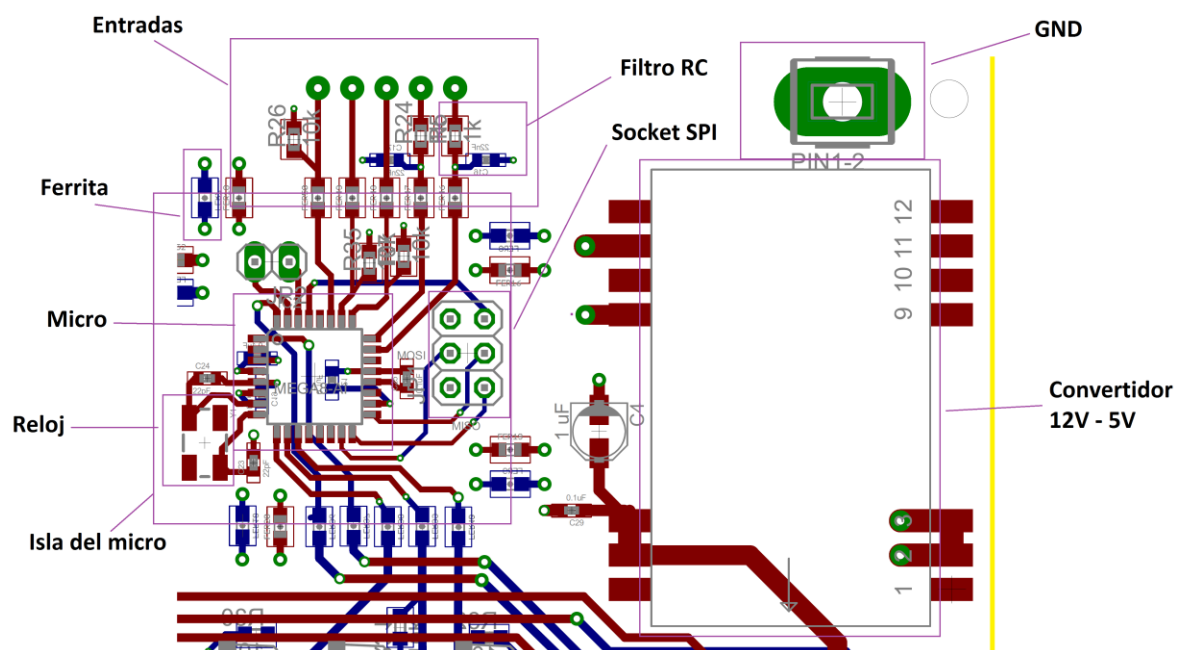


Figura 5.25 Detalle de la parte superior de la PCB

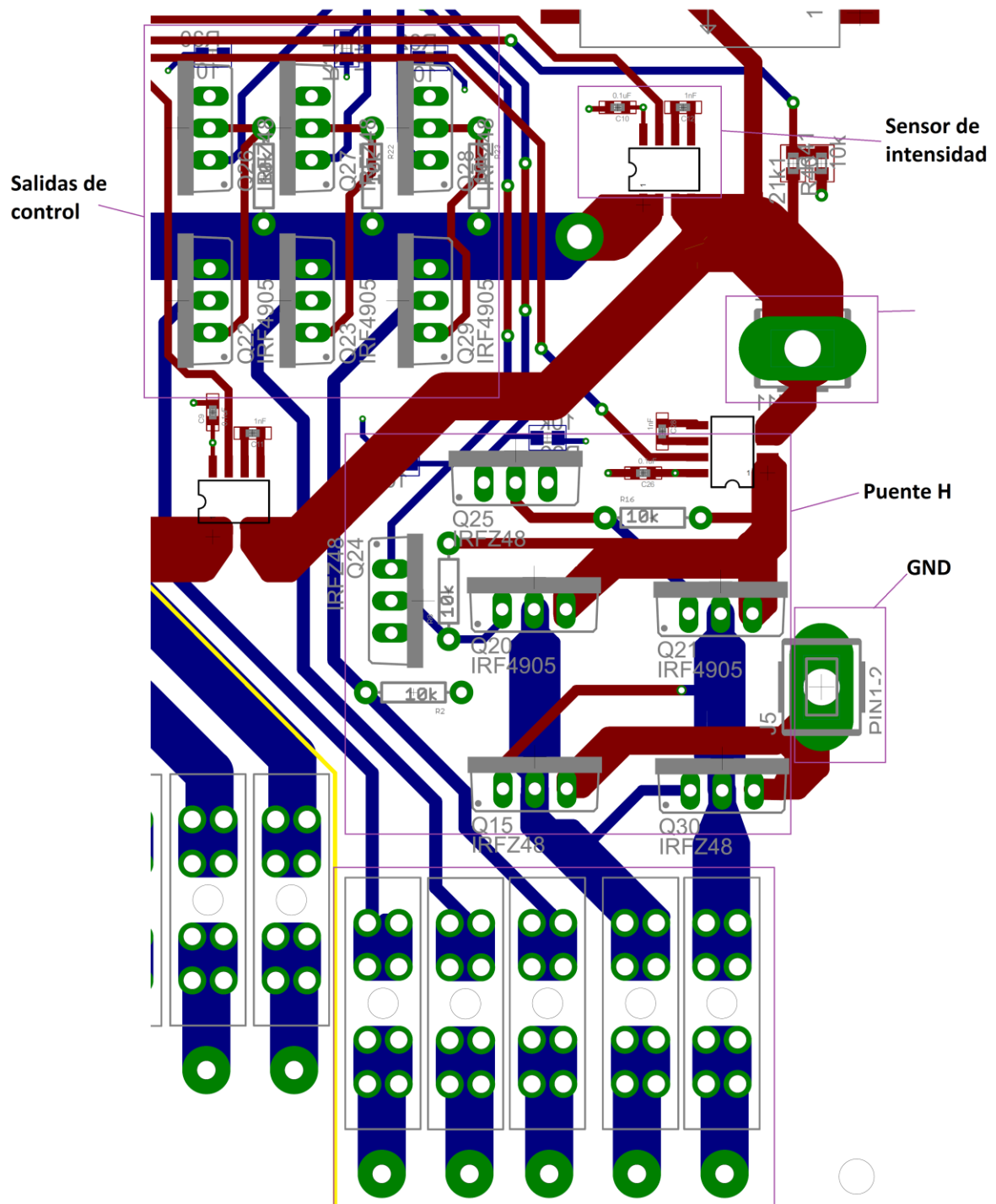


Figura 5.26 Detalle de la parte inferior de la PCB



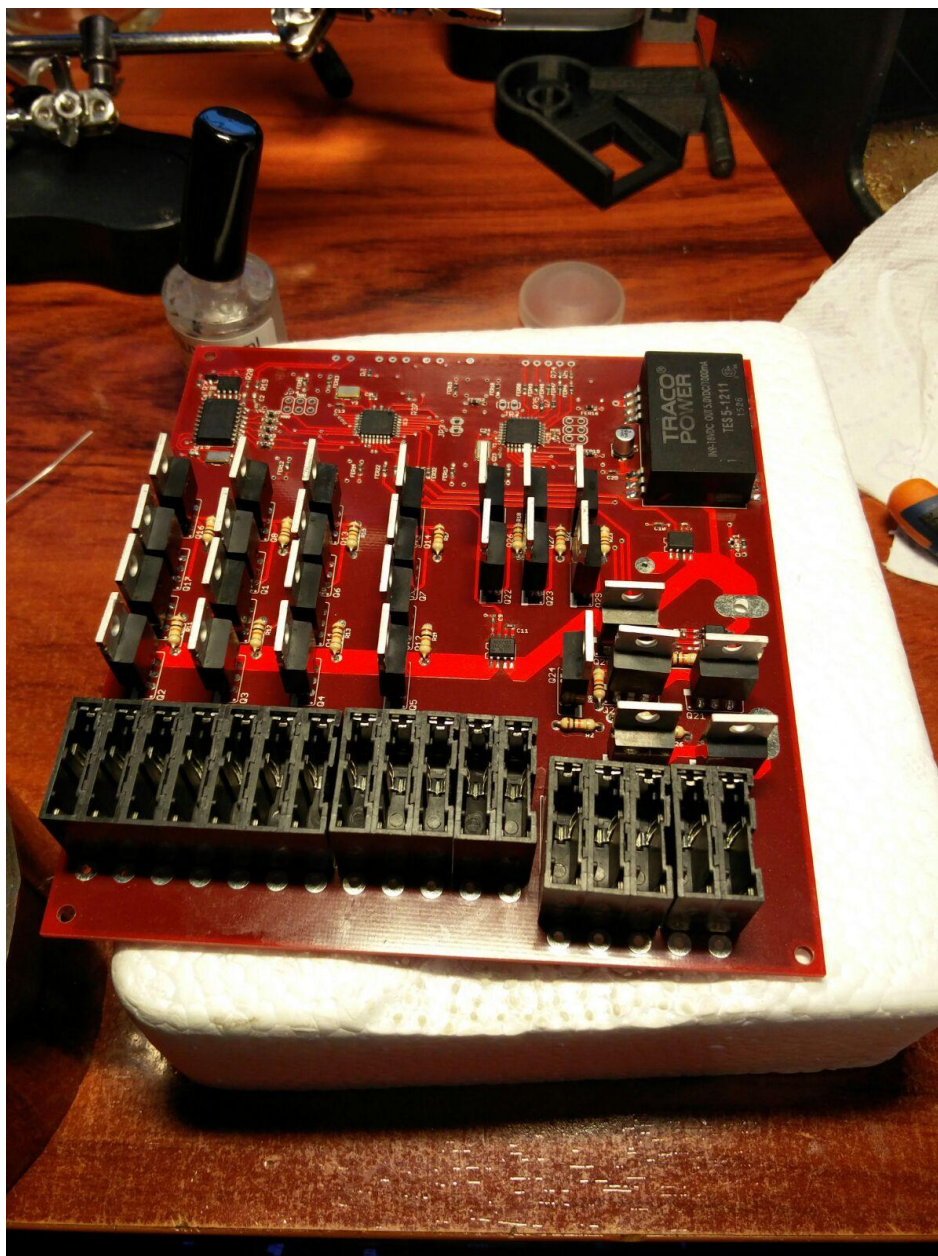


Figura 5.27 PCB de control de potencia eléctrica y del sistema de cambio

Los planos de cada capa a escala de la PCB se pueden observar en el anexo 11.

Terminada la PCB todo está listo para empezar con la programación del micro que se realizará a través de las conexiones SPI microcontrolador.

## 5.6 Programación del microcontrolador

En este punto se dará a conocer algoritmo que se ha seguido en la programación del microcontrolador. Este algoritmo está basado en datos tomados a partir de la puesta a punto del sistema, por lo tanto también se mostrarán datos tomados durante este período y el procedimiento llevado a cabo para realizar una programación eficiente. Uno de los códigos cargados en el microcontrolador se puede consultar en el anexo 8.



### 5.6.1 Algoritmo

A continuación se explicará el algoritmo que se ha programado en el control del cambio. Este algoritmo siempre ha estado bastante claro durante todo el proceso de diseño a falta de detalles como por ejemplo qué subrutinas de seguridad aplicar o si es necesario configurar o no la interrupción por periférico. El algoritmo descrito aquí está pensado para ser programado con interrupción de periférico aunque se puede asegurar que en la realidad no hay diferencia entre emplear esta funcionalidad del microcontrolador o no (de hecho, el código del anexo 8 no incluye esta configuración).

Por tanto el código estará compuesto por un **bucle principal** más dos funciones adicionales (**subida y bajada**) que se ejecutarán cuando se accione una de las dos interrupciones por periféricos. A continuación en las figuras 5.28 se muestran los algoritmos de estas 3 funciones.

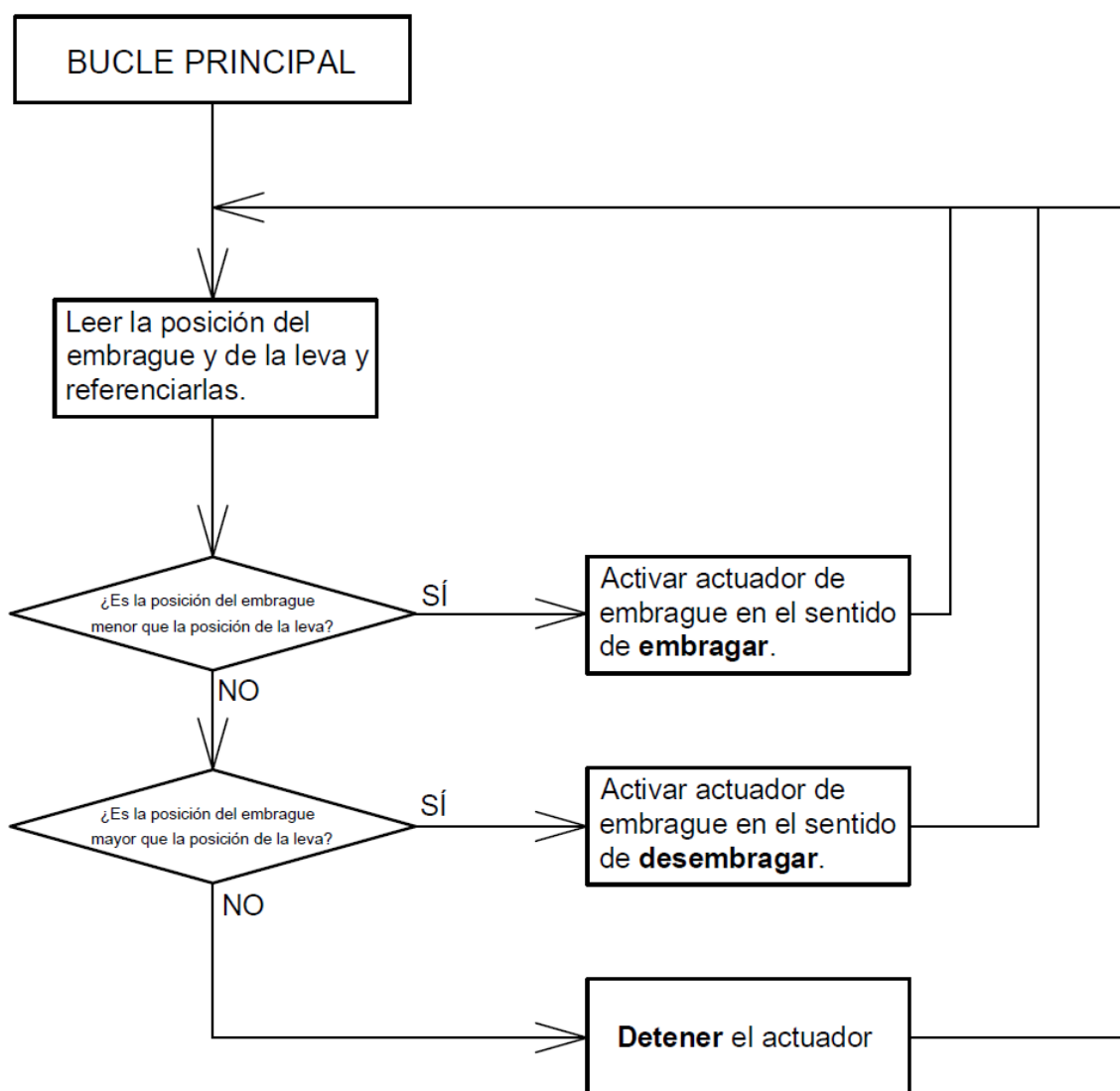


Figura 5.28 Diagrama de flujo del control del bucle principal o de seguimiento de leva

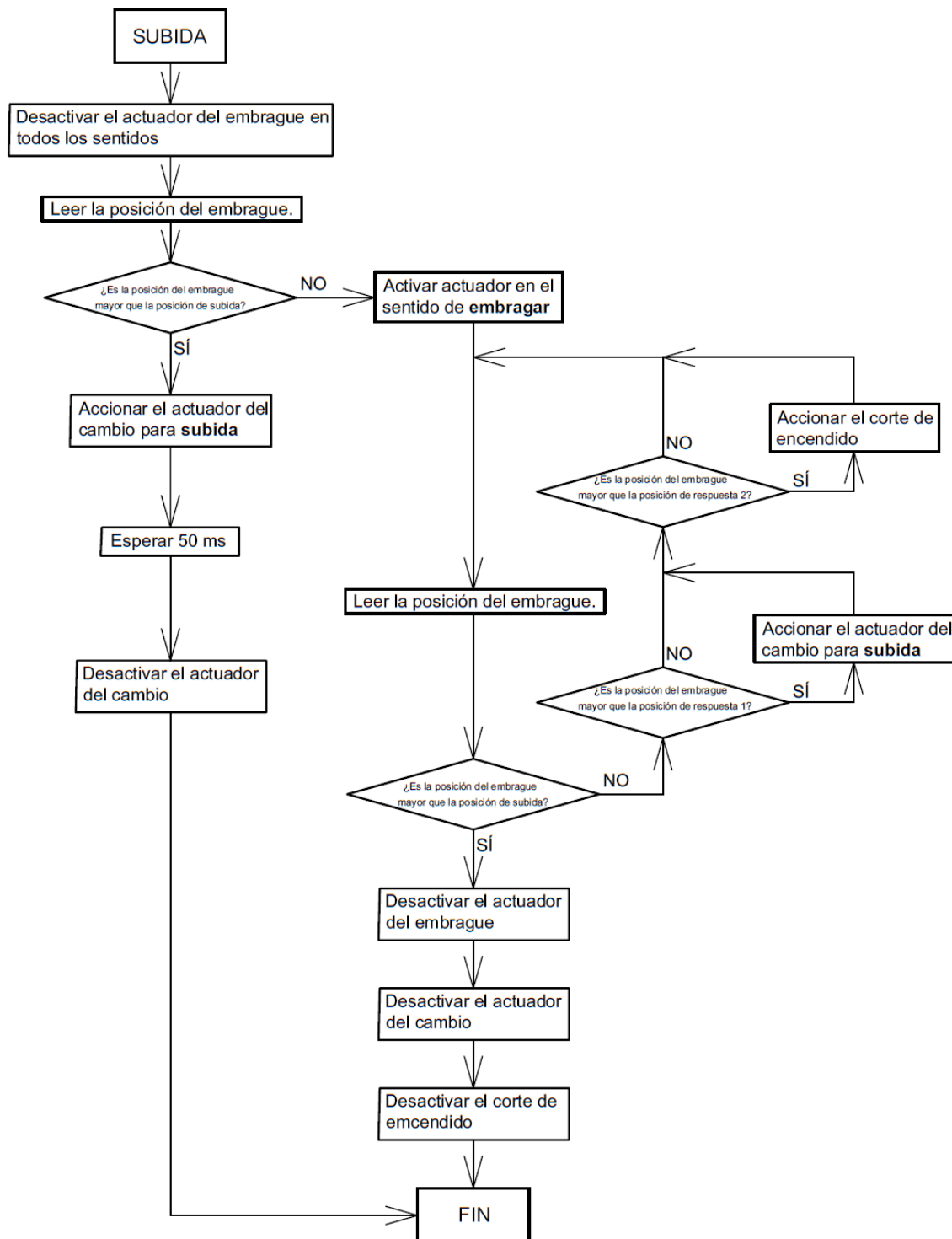


Figura 5.29 Diagrama de flujo del control de la operación de subida

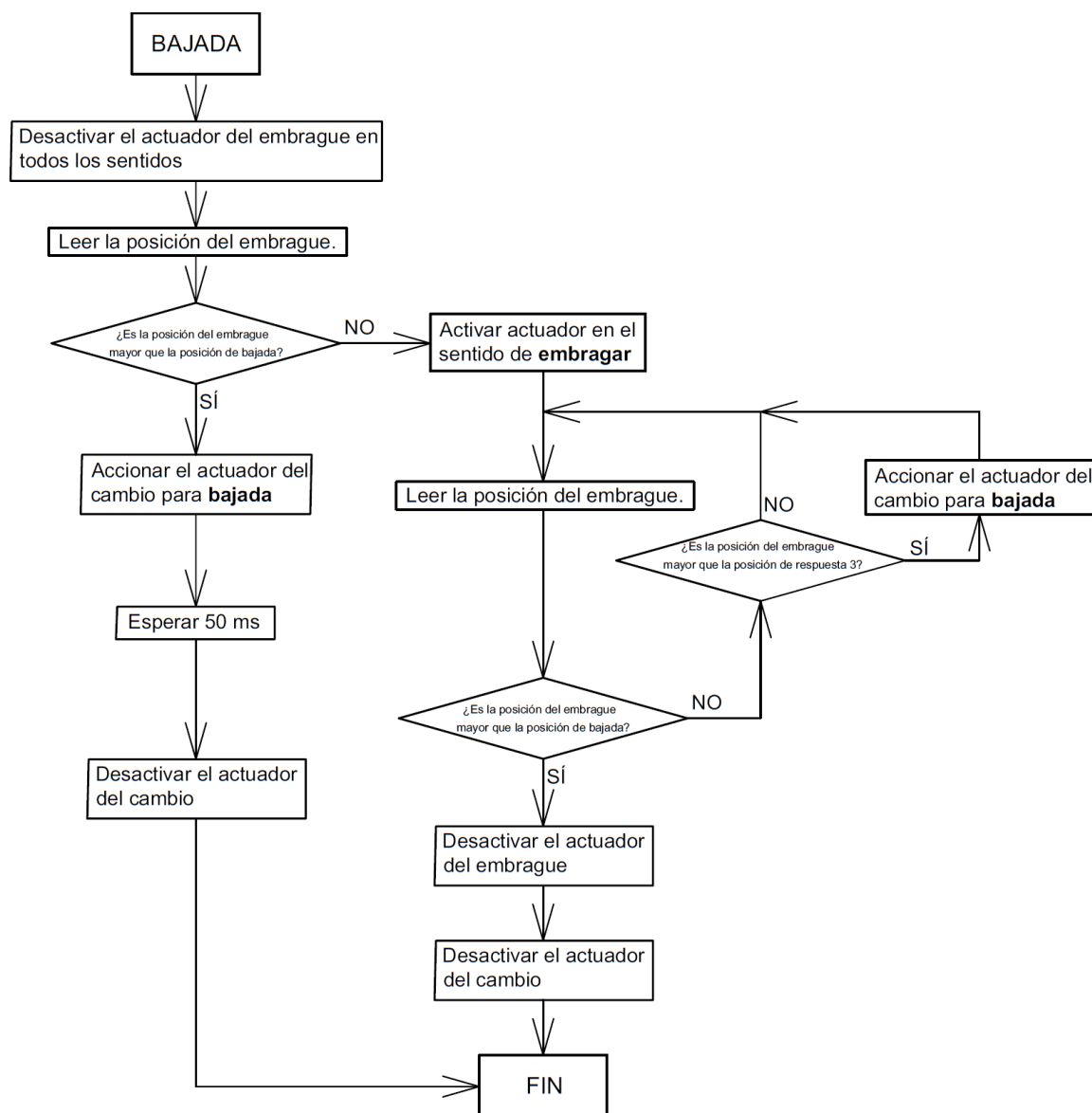


Figura 5.30 Diagrama de flujo del control de la operación de bajada

En la figura 5.28 se muestra el diagrama de flujo que se ejecutará continuamente en el controlador. Este bucle se centra únicamente en el **control del embrague** y lo que hace básicamente es hacer que este **"siga" a la leva** del embrague situada en el volante. El controlador realiza esta tarea comparando las dos señales analógicas procedentes del actuador y de la leva del embrague. Lógicamente estas dos medidas no estarán referenciadas al mismo ángulo y los intervalos de trabajo de cada una serán diferentes, por lo que es necesario realizar un proceso de acondicionamiento de la medida vía *software* de forma que estas puedan ser comparadas correctamente. Este proceso se realiza dentro del diagrama en el **proceso de lectura** y se basa en una operación denominada "mapeado" (del inglés *map*). Esta operación nos permite **convertir rangos de variación** con un carácter lineal. En este caso sería especialmente intuitivo trabajar en grados, concretamente en un **rango de variación de 0 a 24°** como se vio en el capítulo 1, en lugar del **valor decimal** que se obtiene del convertidor analógico digital del microcontrolador. Con este objetivo se realiza un "mapeado" de la función de la siguiente forma:

1. Se sabe que el potenciómetro tiene un **giro máximo de 300°**, sus **señales de referencia son 5V y 0V** y que el conversor analógico-digital del ATmega es de 10bits; por lo que los 300° del potenciómetro (anexo 3) se corresponderán con 5V y a su vez estos con el valor decimal 1023 y los 0° del potenciómetro con 0V y el valor decimal 0.

2. Se supone ahora que el ángulo del *lifter lever* en la posición de reposo o de acoplamiento cigüeñal-transmisión del embrague se corresponde con  $150^\circ$  grados del potenciómetro, que empleando los datos del apartado anterior equivalen a 2.5V y a su vez a 511 después del conversor analógico digital del micro. Al estar calado a  $150^\circ$  el potenciómetro la posición límite será  $174^\circ$  que se corresponderá con 593.
3. Una vez que se conoce el rango de variación de la señal recibida se puede realizar el mapeado de la señal para pasar del rango de variación decimal de [511,593] a [0,24]. Se toma este rango para que cada valor decimal se corresponda con  $1^\circ$  en la posición del *lifter lever* (el recorrido de este era de  $24^\circ$  como se obtuvo en el capítulo 2) y así tener un rango más intuitivo y manejable. Por ejemplo en este mapeado para un ángulo de  $158^\circ$  medido por el actuador se obtendría un valor de 8°. Todos estos rangos de transformación se pueden observar en la figura 5.31.



Figura 5.31 Intervalos de variación de la medida de la posición del embrague

Este mismo proceso es realizado para leva de embrague: se calculan los valores mínimo y máximo decimales entre los que variará la señal medida por el micro y se realiza un mapeado de la medida desde dicho intervalo a [0,24]. Una vez realizado este mapeado se tienen **las dos medidas entre 0 y 24 listas para ser comparadas**. Aclarar que los valores empleados dependen fuertemente de la posición en la que se ensambla el potenciómetro por lo que cada vez que este se monta y se desmonta suele cambiar el rango de variación y es necesario volver a calcularlo, como se verá en la puesta a punto.

Una vez que se tienen las dos señales referenciadas de la misma forma llega el momento de **que sean comparadas**. Esta comparación se realiza de la siguiente forma: en primer lugar se comprueba si la posición del embrague o del *lifter lever* es menor que la posición que dicta la leva del embrague. Si se da esta situación el actuador debería ser activado en **el sentido de embragar** y se volvería al principio del bucle para volver a comparar las posiciones. En el caso de que no se de esta situación se pasa a comparar si la posición que dicta la leva es menos que la del *lifter lever*, que en caso afirmativo se activaría el actuador en **el sentido de desembragar**. Por último si no se da esta situación, **por descarte**, estas han de ser iguales y por tanto **se desactiva el actuador** en ambos sentidos. Todas estas operaciones de comparación se han realizado dentro de un rango o margen de  $\pm 1$ , es decir, para que se considere que la posición de la leva del embrague sea mayor que la posición del actuador del embrague tendrá que ser mayor que la posición de este  $+1$ , que aplicando la mismo procedimiento para el caso de inferioridad hace que la posición del embrague se pueda **precisar con  $\pm 1^\circ$  de precisión** que equivale a **un 12.5%** ( $3^\circ$  de precisión en un rango de  $24^\circ$ ), **el cual se considera suficiente para la aplicación**.

Antes de pasar a los siguientes algoritmos es necesario aclarar que por seguridad la operación de activación del actuador del embrague en cualquiera de los sentidos siempre lleva consigo siempre la desactivación del sentido contrario, de modo que nunca se produzca la última **situación de la tabla 5.2**.

Por otra parte en la figura 5.29 se observa el diagrama de flujo para la operación de subida. Esta operación comienza una vez que se acciona la leva para la subida situada en el volante. Una vez que esto ocurre, se produce una interrupción del bucle principal y se comienza a ejecutar del algoritmo. En primer lugar, lo primero que se hace es **desactivar el giro del actuador del embrague** para el caso en el que este se encontrase activado en el sentido opuesto. El siguiente punto provoca una bifurcación del algoritmo dividiéndolo en dos ramas relativamente diferentes, que aunque ambas provocan una subida de marcha, lo hacen en situaciones diferentes. La elección entre una rama u otra se basa **en la comparación de la posición del embrague con la ya denominada posición de subida**, pero en este caso no es necesario un mapeado de la señal ya que únicamente se compara esta con el valor decimal equivalente a la posición de subida obtenido durante la puesta a punto. Se explicará cada caso por separado:

- **Posición de embrague mayor que la posición de subida.** En esta situación no es necesario embragar ya que el motor se encuentra embragado y se trata de un caso **puramente secuencial**, se suceden una serie de instrucciones y órdenes con el fin de que se produzca la subida de marcha. Como se observa en el algoritmo es necesario mantener durante 50 ms a nivel alto el actuador para que este responda con la suficiente fuerza. Este caso se corresponde con una situación en la que el piloto tendría el motor embragado por medio de la leva de embrague.
- **Posición de embrague menor que la posición de subida.** En este caso es necesario embragar, por lo que es necesario activar el actuador del embrague en el sentido de embragar hasta que este alcance la posición de subida. En el transcurso de esta iteración es necesario realizar una serie de **tareas previas** antes de que el actuador alcance esta **posición de subida**, estas son la **activación del actuador** del cambio 50 ms antes de que este el actuador del embrague alcance la posición de subida (a esta posición en el algoritmo se le denomina posición de **respuesta 1** y se determinará durante la puesta a punto) de forma que cuando el embrague alcance la posición de subida este efectúe la subida de marcha con la suficiente fuerza; la otra tarea está referida a la posición de **respuesta 2** y tiene el mismo propósito que la anterior pero en este caso con el **corte de encendido**. De esta forma todo queda sincronizado y el tiempo total invertido en el proceso es mínimo. Una vez transcurrido estos procesos se llevan todos los actuadores a un nivel bajo y da por terminado el algoritmo de la subida de marcha.

Como se ha visto, en ninguna de las partes del algoritmo de subida el embrague es devuelto a la posición de reposo o 0°, sino que **es el algoritmo principal el encargado de devolver el embrague a esta posición**. De nuevo se vuelve a hacer referencia que toda activación del actuador del embrague en un sentido o en otro lleva siempre inscrita la desactivación del sentido contrario.

Por último en la figura 5.30 se ha representado el **diagrama de flujo para el algoritmo seguido en la bajada de marcha**. Este es bastante similar al anterior solo que no es necesario efectuar el corte de encendido y en lugar de activar el actuador del cambio en el sentido de subida hay que hacerlo en el de bajada. También es importante remarcar que al ser la posición de bajada mayor que la posición de subida no se puede emplear la posición de respuesta 1 y se debe emplear otra diferente denominada posición de **respuesta 3**. Como ya se ha dicho antes no es necesario mapear en este caso la medida de la posición del embrague siempre que las posiciones de subida, bajada, respuesta 1, respuesta 2 y respuesta 3 estén referenciadas al propio rango decimal del convertidor analógico del 0 al 1023.

### 5.6.2 Métodos de seguridad *software*

Para asegurar **una buena y segura actuación** del sistema del cambio se aplican subrutinas que intentarán que esto ocurra y **preservar la integridad de todos los sistemas**. Estos métodos son los siguientes:

- Un método ya comentado es **forzar el nivel bajo** en un sentido de giro del actuador del embrague siempre que se vaya a activar el opuesto. De esta forma se puede asegurar que nunca estarán ambos giros a nivel alto a la vez.
- **Dejar un margen con el límite del mecanismo del embrague**, de forma que mediante el accionamiento de la leva de embrague nunca se alcance esta posición. Esto se consigue fácilmente con el mapeado, una vez que se calcula el valor decimal correspondiente a dicha posición límite solo se tiene que emplear un valor inferior a este en la operación mapeado de forma que este se corresponda con 24 y que nunca se alcance el verdadero valor límite.
- **Filtro anti rebote *software* para la subida y la bajada.** Este filtro hace que la leva de subida y la de bajada deban permanecer a activadas un cierto tiempo para que dé comienzo el bucle de subida o el de bajada respectivamente. Este tiempo es **despreciable para el piloto** pero a nivel electrónico permite evitar que se produzca una activación de la subida o de la bajada indeseada por una tensión o corriente espuria. En el código del anexo 8 esto se consigue mediante **un contador** que se incrementa por cada ciclo del bucle principal que la leva esté pulsada hasta que este contador alcance un determinado valor.
- **Desechar posiciones absurdas.** Una vez que se obtienen los rangos decimales entre los que variará cada señal analógica se pueden desechar los valores que estén fueran de este rango. Por ejemplo para el caso de la leva del embrague, si durante la puesta a punto se ha estimado que la medida de la posición de la leva varía entre 400 y 500 todo valor que este fuera de ahí será absurdo y se deberá a problema *hardware*, como por ejemplo la falta de alimentación o la rotura de un cable.

- Chequeo de que **exista coherencia** entre **el sentido el actuador activado** y **la medida de la posición** de este. Por ejemplo si se activa el actuador en el sentido de embrague y transcurrido un instante se observa que el sensor de posición no varía de nuevo existe un **problema hardware**, que puede proceder del propio actuador (el cual puede que realmente no esté girando) o que el potenciómetro no esté midiendo correctamente.

En el anexo 12 se puede ver el algoritmo completo donde también se incluye el método de seguridad de forzar el nivel bajo ya que el resto son subrutinas que se aplican dentro del proceso de comparación o de lectura.

### 5.6.3 Nociones sobre la puesta a punto

La puesta a punto se puede estructurar en 3 períodos diferentes: previa a montaje, una vez montada pero con el motor parado y en pista.

1. **Previa a montaje.** En esta parte de la puesta a punto se prueba que todo funcione correctamente y según lo esperado. Se comprueba que todas las entradas y todas las salidas sean coherentes con el código programado. En la figura 5.32 se puede ver una captura de este periodo en la cual se ven dos pulsadores que representan las levas de subida y bajada y en la parte inferior la leva del embrague en impresión 3D (aun sin pintar). En este momento aún no se puede obtener ninguno de los valores como la posición de subida, la de bajada, la de respuesta 1, etc.

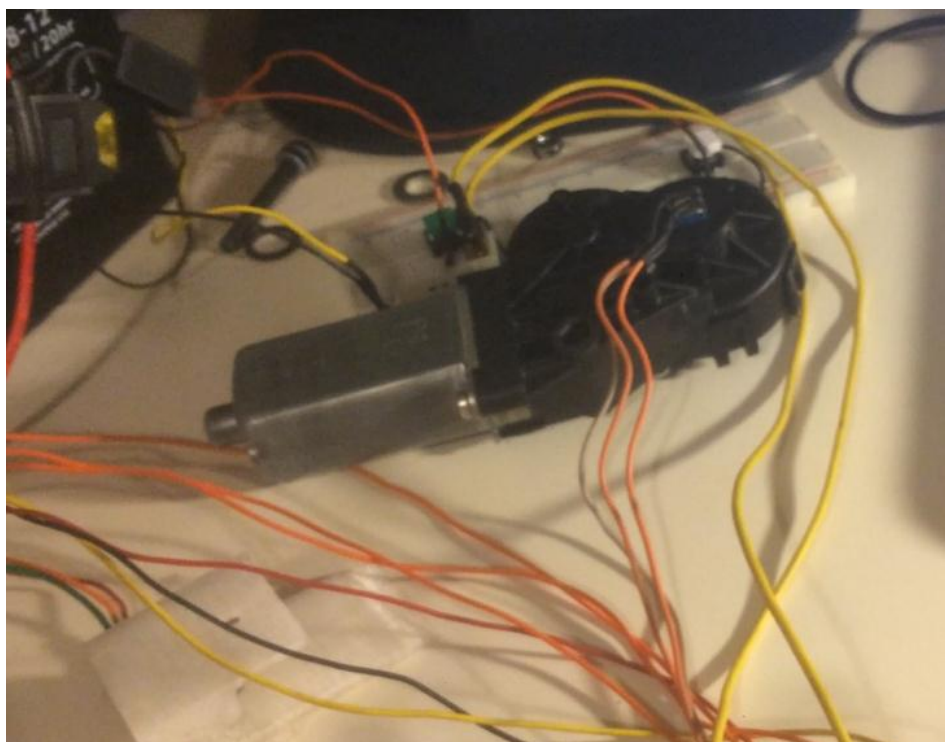


Figura 5.32 Puesta a punto del sistema del cambio antes de que sea montado en el motor

2. **Puesta a punto con el motor en banco.** Es en este período cuando se realiza el 90% de la puesta a punto necesaria para la correcta actuación del sistema. Principalmente porque este se puede probar en su totalidad (actuador del cambio y actuador del embrague) y en condiciones similares a pista. En esta parte el procedimiento a seguir es el siguiente: en primer lugar se trabaja el **control de embrague** y **una vez que este pasa a ser dominado** se comienza a poner a punto **la coordinación** entre este y el actuador del cambio. Lógicamente no se puede comenzar probando el código final con los valores de prueba del período anterior sino que se deben obtener los valores reales de estos con el sistema ya montado. Los valores a obtener son: **posición subida, posición de bajada** y lógicamente **los valores decimales**



**correspondientes a los puntos donde el *lifter lever* comienza a embragar** (posición de reposo) **y el límite del mecanismo.** Para el cálculo de estos se ha aprovechado la propiedad que tiene el actuador del embrague de permanecer en una determinada posición sin consumir corriente eléctrica aunque este esté sometido a un cierto par. Con el uso de esta característica se realiza un **control en tiempo** activando el actuador en un sentido durante **cortos intervalos de tiempo** (de 10 a 20ms) hasta que este alcance la posiciones deseadas<sup>15</sup>. Una vez que este alcance dicha posición se envía el valor decimal obtenido del puerto analógico por serial de forma que este sea mostrado en el monitor de ordenador (un ejemplo de esto se observa en la figura 5.34). En el caso de la leva del embrague únicamente es necesario determinar el rango de la posición (en decimal) para posteriormente realizar el mapeado de la medida. Con este objetivo se realiza un procedimiento análogo al anterior pero en este caso esta se puede mover con la mano. Estimando los valores mediante este procedimiento y realizando correctamente el mapeado de la señal se consigue realizar un control eficiente del embrague. Para conseguir **una correcta coordinación es necesario estimar la posición de respuesta 1, la posición de respuesta 3 y el tiempo que es necesario mantener a nivel alto el actuador del cambio para que actúe con la suficiente fuerza** (para el caso en el que motor este embragado por el uso de la leva de embrague). Estos 3 valores vienen a cuantificar la misma magnitud: el tiempo de respuesta (o para que funcione eficientemente) del actuador del cambio, solo que medido respecto a referencias diferentes. La estimación de estos se basa únicamente en la habilidad del programador o del piloto. Una vez que se obtienen estos valores, el sistema queda listo para ser probado con el motor en marcha y el vehículo en movimiento.



Figura 5.33 Captura del actuador del embrague embragando

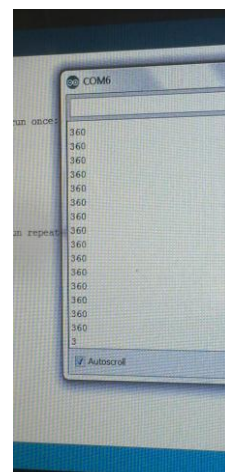


Figura 5.34 Representación en pantalla del valor obtenido del conversor A/D a partir de la señal analógica del sensor de posición del embrague.

3. **Puesta a punto en pista.** Se terminan de pulir todos los parámetros y se define la posición de respuesta 2. La determinación de estos se basa en el testimonio del piloto una vez que prueba el coche en pista. Un caso típico puede ser que este requiera que el actuador del cambio ejerza más fuerza, para lo cual habría que disminuir el valor de las posiciones de respuesta 1 y 3. Otro caso puede ser que no terminan de entrar las marchas en reducción, por lo que habría que aumentar la posición de bajada. Por otra parte la posición de respuesta 2 se debe fijar en función de cómo sea configurada la ECU. Se puede decir tras la experiencia que el sistema es **bastante sensible** a pequeños cambios, por ejemplo aumentar o disminuir en 5 ms el tiempo que el actuador del cambio permanece a nivel alto puede ser la diferencia entre que cambie de marcha correctamente o se produzca lo que se conoce como "marcha perdida"<sup>16</sup>. De la misma forma la propia **técnica de conducción** del piloto influye fuertemente en el funcionamiento del sistema, mejorando o empeorando una misma configuración.

<sup>15</sup> Por ejemplo para el caso de la posición de bajada, se sabe si se ha alcanzado esta posición o no aplicando un par sobre el piñón de salida de la caja de cambios y viendo si este se mueve o no (con una marcha metida). En caso afirmativo se está en una posición en la que el cigüeñal y la caja de cambios se encuentran desacoplados y por tanto podría ser una posible posición de bajada.

<sup>16</sup> Del inglés *misses gear shift*, nombre que se le da al suceso que aparece cuando el actuador del cambio actúa pero no consigue realizar el cambio de marcha por falta de fuerza.



Figura 5.35 ART-17 durante una jornada de tests



## 6 CONCLUSIONES Y BALANCE

---

En este último capítulo de la memoria se hace un balance general sobre los resultados obtenidos y se plantean una serie de mejoras futuras para optimizar el sistema.

Tras haber realizado aproximadamente unos 500km de test con el monoplaza se puede afirmar que el sistema **satisface todas las necesidades** (rápida respuesta, funcionamiento esperado, bajo peso...) y unido al embrague antirrebote mejora el rendimiento del monoplaza en pista notablemente, a cambio de una baja fiabilidad basada en lo **tediosa** que resulta su **puesta a punto** (hay que repetir parte de ella cada vez que el sistema se monta y se desmonta) y a que abarca multitud de elementos que fallando únicamente uno se produce un fallo en cadena (provocado por una **baja redundancia** de estos elementos). Alternativamente se proponen una serie de mejoras futuras que mejorarían el sistema en diferentes aspectos:

- **Potenciómetro de varios giros para el actuador del embrague (más de 300°).** Durante la puesta a punto a punto (especialmente en la primera fase) puede resultar útil ya que permite un rango de movimiento mucho mayor y por tanto se simplificaría su colocación. Aumentaría la versatilidad en el montaje.
- **Un microcontrolador más rápido.** La velocidad actual del microcontrolador es suficiente para controlar el sistema, pero si se desean realizar *data logs* o enviar la señal vía *can bus* o I2C comienza a ser insuficiente, incrementándose esta insuficiencia si se desea aplicar alguna subrutina de seguridad más compleja que las ya descritas.
- **Servo de potencia.** En el mercado se pueden encontrar servomotores de potencia capaces de desarrollar la potencia necesaria para mover el embrague a velocidad suficiente. Adquirir un servo de estas características daría **un salto de calidad** enorme en prácticamente todos los aspectos del sistema (no únicamente en el control del embrague), a cambio de un **sustancial aumento de precio** (supone un aumento de más del 1000% respecto al motor BOSCH). Se obtendrían ventajas como: mayor **velocidad** y especialmente mayor **precisión en el movimiento** del *lifer lever*; un **menor gasto computacional**<sup>17</sup> en el microcontrolador debido a que el control es mucho más sencillo, lo que también provoca una **simplificación y reducción del periodo de puesta a punto**; simplificación de la PCB, **no es necesario el puente H**; en función del modelo seleccionado este puede llegar a tener un **peso inferior** y al estar pensado para este tipo de aplicaciones su adaptación al motor y al *lifer lever* puede llegar a ser más sencilla. Por otra parte al usar un motor servo no es estrictamente necesario usar un sensor de posición pero es interesante mantenerlo para tener en cada momento la posición real del embrague.
- **Actuador neumático para el cambio de marcha.** La sustitución del actuador puramente eléctrico por uno neumático permitiría una reducción del consumo eléctrico ya que solo es necesario controlar las electroválvulas, las cuales tienen un consumo muy reducido. Por otra parte en los sistemas neumáticos se puede regular la fuerza con la que este actúa ya que esta depende del caudal de descarga. En contra la complejidad del diseño del sistema aumenta notablemente pero realizando un buen dimensionamiento se puede llegar a reducir el peso

---

<sup>17</sup> Un menor gasto computacional produce numerosas mejoras de forma indirecta como mejores subrutinas de seguridad para hacer un





# REFERENCIAS

---

- [1] HONDA, Manual HONDA CBR 600 2003-06.
- [2] Flatshifter, Quickshifter.
- [3] MathWorks, «Matlab - MathWorks,» MathWorks, [En línea]. Available: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com).
- [4] M. R. Danta, «Mecánica,» Secretariado de publicaciones de la Universidad de Sevilla, 2013.
- [5] D. Systemes, «CATIA - Dassault Systemes,» Dassault Systemes, [En línea]. Available: [www.3ds.com](http://www.3ds.com).
- [6] S. INTERNATIONAL, 2016 Fomula SAE Rules, 2016.
- [7] D. d. I. Menánica, «Open Course Ware - Universidad Carlos III de Madrid,» [En línea]. Available: [http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/disenio-mecanico-1/material\\_clase/ocw\\_resorte\\_flex](http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/disenio-mecanico-1/material_clase/ocw_resorte_flex).
- [8] M. Stock, «muellestock.com,» Muelle Stock, [En línea]. Available: <https://muellestock.com/es/producto/createoferta?tipo=Torsi%C3%B3n>.
- [9] F. J. M. Díaz, Gestión del sistema eléctrico de un monoplaza.
- [10] ATMEL, «Atmel - 8271J - AVR - ATmega Datasheet,» 2015.
- [11] Wikipedia, «Wikipedia,» Wikipedia, [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface\\_Bus](https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus).
- [12] PSPICE, «PSPICE Homepage,» PSPICE, [En línea]. Available: [www.pspice.com](http://www.pspice.com).
- [13] T. M. U. W. P. R. Ned Mohan, POWER ELECTRONICS: Converts, application and Design.
- [14] I. Rectifier, «IR4905,» 2007.
- [15] I. Rectifier, «IRFZ44N,» 2007.
- [16] L. E. Management, Link G4 - Wiring and Installation Manual, Electronz Ltd, 2013.
- [17] Autodesk, «EAGLE - Autodesk,» Autodesk, [En línea]. Available: [www.autodesk.com](http://www.autodesk.com).
- [18] T. POWER, «DC/DC Converters TES 5 series, 5 Watt,» 2016.
- [19] J. P. López Veraguas, Compatibilidad electromagnética y seguridad funcional en sistemas electrónicos, Marcombo S.A., 2006.
- [20] Wikipedia, «Wikipedia - Ficha técnica,» Wikipedia, 5 Mayo 2017. [En línea]. Available:

---

[https://es.wikipedia.org/wiki/Ficha\\_t%C3%A9cnica](https://es.wikipedia.org/wiki/Ficha_t%C3%A9cnica). [Último acceso: 6 5 2017].

[21] Wikipedia, «Wikipedia - Duty cycle,» Wikipedia, 5 Marzo 2017. [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Duty\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Duty_cycle). [Último acceso: 06 Mayo 2017].

[22] Wikipedia, «Wikipedia,» Wikipedia, [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Jumper\\_\(computing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Jumper_(computing)).

[23] J. M. N. T. G. M. Eduardo Águeda Casado, Sistemas de transmisión de fuerzas y trenes de rodaje.

# ÍNDICE DE TÉRMINOS

---

Assembly	Conjunto o montaje de un determinado de elementos independientes o subconjuntos que deben ir unidos en un determinado mecanismo o máquina.
Brush	Referente a los motores eléctricos tipo <i>brush</i> , que significa escobilla. Estos motores emplean escobillas para transmitir la corriente eléctrica al rotor del motor eléctrico.
Brushless	Referente a los motores eléctricos tipo <i>brushless</i> , que significa sin escobilla. En este no se emplean escobillas debido a que el rotor está formado por un imán permanente o utiliza otro tipo de configuración.
Clutch-by-wire	Expresión que hace referencia a un sistema de embrague en el cual no existe conexión mecánica entre los mandos del piloto y el propia embrague, únicamente conexión eléctrica.
Clutch cable	Cable de acero alojado en el interior de una funda que transmite fuerza mecánica desde una determinada palanca, pedal o maneta hasta el embrague de un motor.
Cockpit	Habitáculo para el piloto en un monoplaza.
Data log	Conjunto de datos grabados durante un cierto proceso o acción de un sistema mediante sonorización y referenciados al instante de tiempo en el que estos fueron registrados con el fin de estudiar, optimizar o comprender cómo se desarrolló dicho proceso.
Datassheet	Es una ficha técnica, hoja técnica u ficha de características que resume el funcionamiento y otras características de un componente o subsistema con el suficiente detalle para ser utilizado por un ingeniero de diseño y diseñar el componente en un sistema. [1]
Duty cliche	Es la fracción de tiempo referente a su período que una señal o sistema permanece activo. Usualmente es expresada como un porcentaje o ratio. [2]
Feedback	Término usado en multitud de contexto para hacer referencia a la acción dar una información, dato u opinión sobre una orden, forma de proceder o de actuar emitida previamente. Por tanto es término empleado tanto sistemas de control como en la vida cotidiana. Se podría traducir como “realimentación”.
Gearshift arm	Leva o brazo que se conecta a la parte final del eje que actúa sobre el desmodrómico de una caja de cambios de una motocicleta. A este leva o brazo se conecta usualmente el pedal sobre el que actúa el piloto.
Jumper	En electrónica un <i>jumper</i> es un conductor de poca longitud usado para conectar, desconectar o anular una parte de un circuito electrónico. Son especialmente usados para programar PCBs y suelen aparecer en grupos a modo de conector denominados <i>jumper blocks</i> [14].
Lifter lever	Elemento de los embragues de discos múltiples cuya parte superior se encuentra fuera del motor y conectada al cable de embrague, mientras que la superior se encuentra introducida en el interior del motor y conectada a al <i>lifter piece</i> . Se encarga de transmitir la fuerza del piloto al <i>lifter piece</i> comportándose a modo de palanca.
Lifter piece	Elemento de los embragues de discos múltiples que se encuentra unido por uno de sus extremos al <i>lifter lever</i> y por el otro al <i>lifter plate</i> . Se encarga de transmitir el movimiento del <i>lifter lever</i> al <i>lifter plate</i> .
Lifter plate	Elemento de los embragues de discos múltiples que se encuentra conectado al <i>lifter piece</i> y sobre el que se apoyan los muelles de embrague. Los muelles ejercen la fuerza elástica sobre este para que ejerza presión sobre los discos de embrague y que de esta forma se transmita el par a través del embrague.
Map	Función <i>software</i> utilizada para transformar intervalos de variación.

MOSFET	Del inglés, “Metal-oxide-semiconductor Field-effect transisto.) Es un transistor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas. Es el transistor más utilizado en la industria microelectrónica, ya sea en circuitos analógicos o digitales, aunque el transistor de unión bipolar fue mucho más popular en otro tiempo. [4]
n-channel	Tipo de transistor MOSFET donde las regiones de dopado para la fuente y el drenador son regiones “n+” y el sustrato es una región de tipo “p”. [4]
p-channel	Tipo de transistor MOSFET donde las regiones de dopado para la fuente y el drenador son regiones “p+” y el sustrato es una región de tipo “n”. [4]
PCB	Placa de circuito impreso, del inglés <i>printed circuit board</i> . Placa de uso electrónico que sirve mecánicamente de soporte y electrónicamente se encarga de conectar los diferentes componentes de la placa por medio de vías, pistas y otros elementos.
Protoboard	Placa genérica perforada preparada para la construcción de circuitos eléctricos de forma rápida y de carácter provisional o con la finalidad de generar un prototipo.
Pull down	Resistencia de <i>pull-down</i> . Configuración eléctrica en la que una resistencia se encarga de aportar un nivel bajo lógico de forma que por ella circula la mínima intensidad posible.
Quick release	Elemento mecánico formado por dos partes que sirve de unión entre el volante de un vehículo y el resto del sistema de dirección. Además, la principal característica de este elemento es que permite una rápida extracción del volante.
Start mode	Configuración temporal de los elementos ajustables de un monoplaza para mejorar o facilitar el rendimiento de este durante la puesta en movimiento. Una vez finalizada está se volvería a una configuración para el monoplaza en movimiento.
Switch	Interruptor con dos estados.
Threshold	Tensión umbral, del inglés <i>threshold voltage</i> . Tensión característica de los transistores.
Throw hole	Característica de algunos componentes eléctricos/electrónicos que indica que para ser montados correctamente sobre una PCB necesitan un agujero pasante en el cual sean soldados.

# ANEXOS

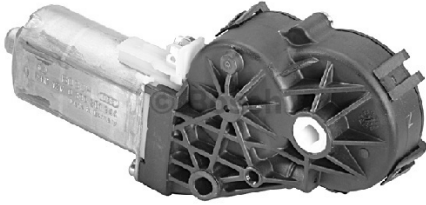
---

Anexo 1: <i>Datasheet</i> BOSCH 0 390 201 944	68
Anexo 2: Actuador del embrague	69
• Anexo 2.1: Actuador completo	71
• Anexo 2.2: Lifter Lever	71
• Anexo 2.3: Sensor de posición	72
• Anexo 2.4: Cogida actuador	73
Anexo 3: <i>Datasheet</i> potenciómetro Alps RK09D113000F	75
Anexo 4: <i>Datasheet</i> plástico ABS	77
Anexo 5: Leva del embrague	80
• Anexo 5.1: Leva embrague completa	
• Anexo 5.2: Soporte leva	78
• Anexo 5.3: Brazo leva	79
• Anexo 5.4: Tapadera inferior	80
Anexo 6: <i>Datasheet</i> plástico PLA 3d850	81
Anexo 7: Muelle a torsión	83
Anexo 8: Ejemplo de código	84
Anexo 9: Código de simulación del proceso de embrague	90
• Anexo 9.1: Código principal	90
• Anexo 9.2: Función adicional: Torque	91
• Anexo 9.3: Función adicional: SE2	92
Anexo 10: <i>Datasheet</i> conector REAN RT3DC-B	93
Anexo 11: Planos PCB	95
• Anexo 11.1: Capa superior	96
• Anexo 11.2: Capa VCC	96
• Anexo 11.3: Capa GND	97
• Anexo 11.4 Capa inferior	98
Anexo 12: Diagrama de flujo completo	99



D.C. motors with transmission

# AHC and AHC 2 | 12 V 8 W

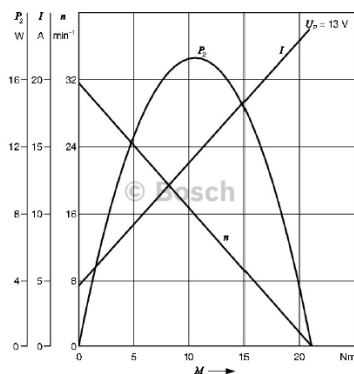


## Technical data

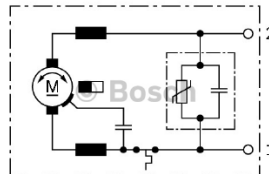
Part number	<b>0 390 201 944</b>
Nominal voltage	$U_N$ 12 V
Nominal power	$P_N$ 8,2 W
Nominal current	$I_N$ ≤ 8 A
Maximum current	$I_{max}$ 24 A
Nominal speed	$n_N$ 26 min <sup>-1</sup>
Nominal torque	$M_N$ 3 Nm
Breakaway torque	$M_A$ ≥ 22 Nm
Reduction	i 185,5 : 1
Direction of rotation	L/R
Type of duty	S 2 - 5 min
Degree of protection	IP 50
Weight	approx. 0,45 kg

Clockwise (+) to 1  
 Anti-clockwise (+) to 2  
 Connector Housing  
 TE AMP 968182-1 / Connector Locker TE  
 AMP 0-968183-1 / Connector Terminals TE  
 AMP Junior-Power-Timer 0-927768-1 (x2) TE  
 AMP Micro-Timer-III 0-968052-1 (x2)

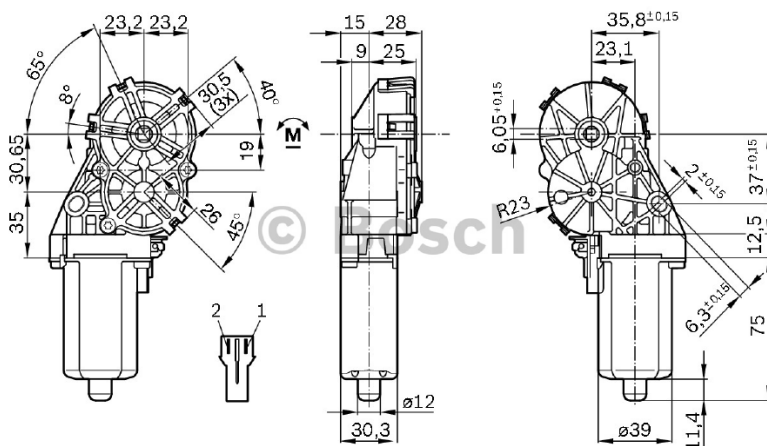
## Characteristic curve



## Connection diagram



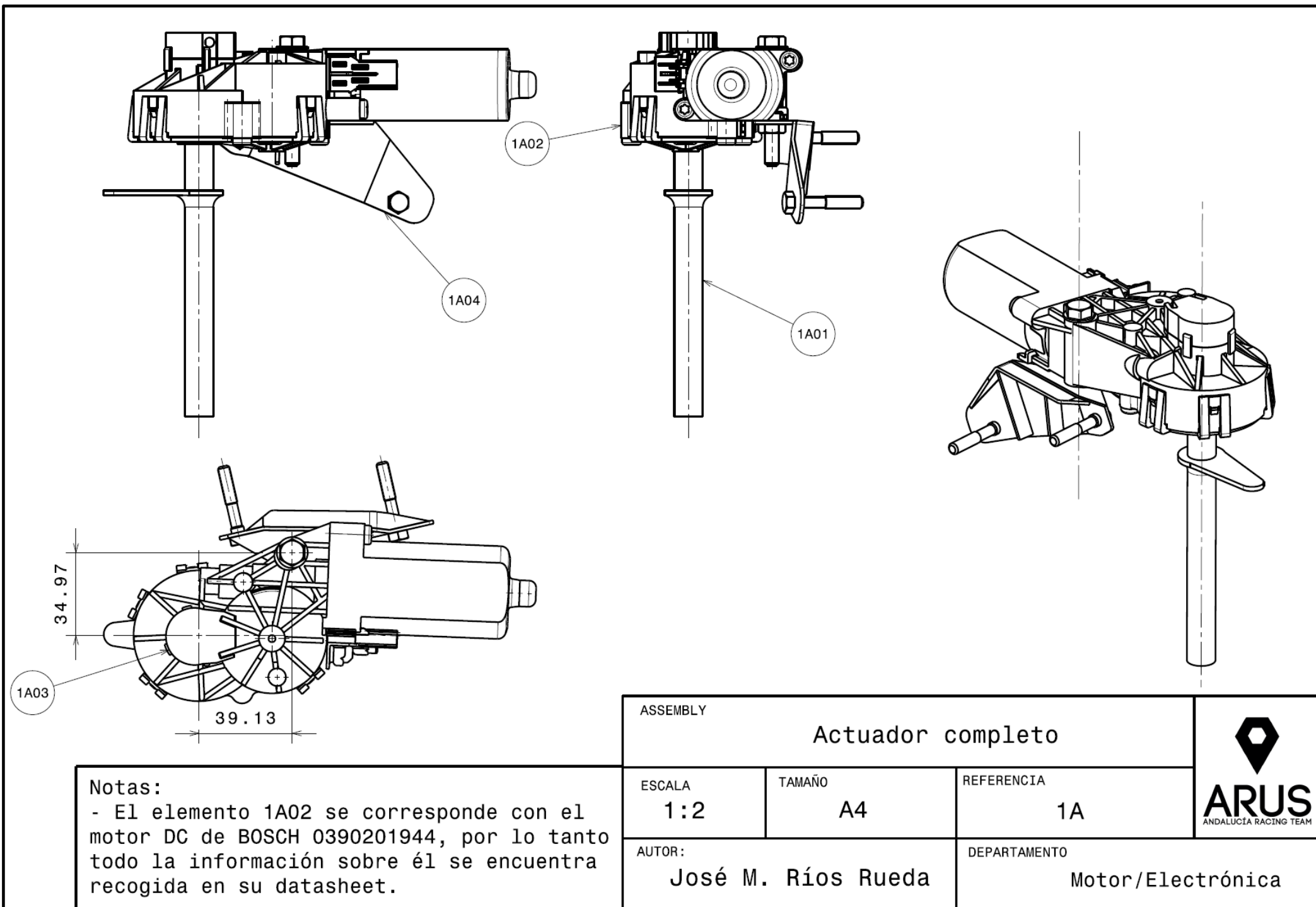
## Dimensional drawing

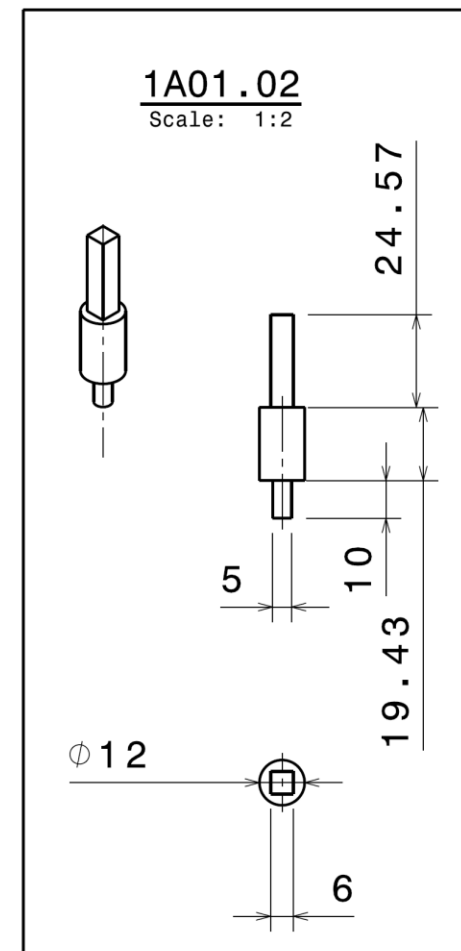
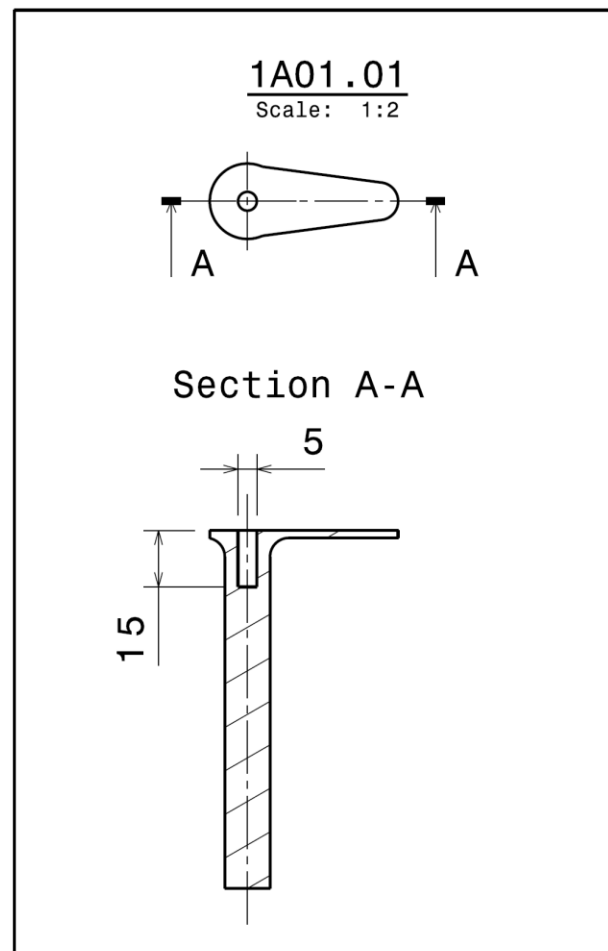
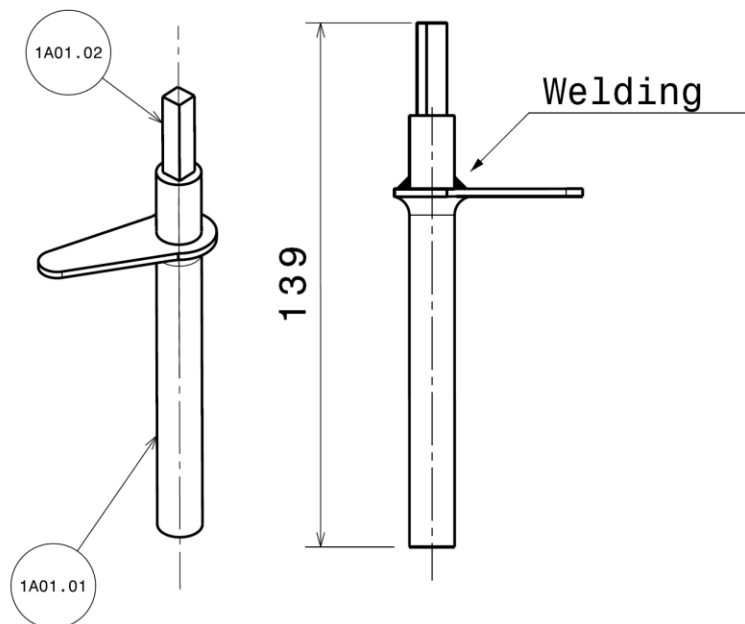


Robert Bosch GmbH  
 Automotive Aftermarket  
 Postfach 410960  
 76225 Karlsruhe  
 Germany

www.bosch-elektromotoren.de







**NOTAS:**

- El elemento 1A01.01 es OEM de Honda por lo que no es necesaria su acotación.
- En cambio, se requiere un taladrado el cual si se encuentra acotado.

ASSEMBLY

Lifter lever

ESCALA

1:2

TAMAÑO

A4

REFERENCIA

1A01

AUTOR:

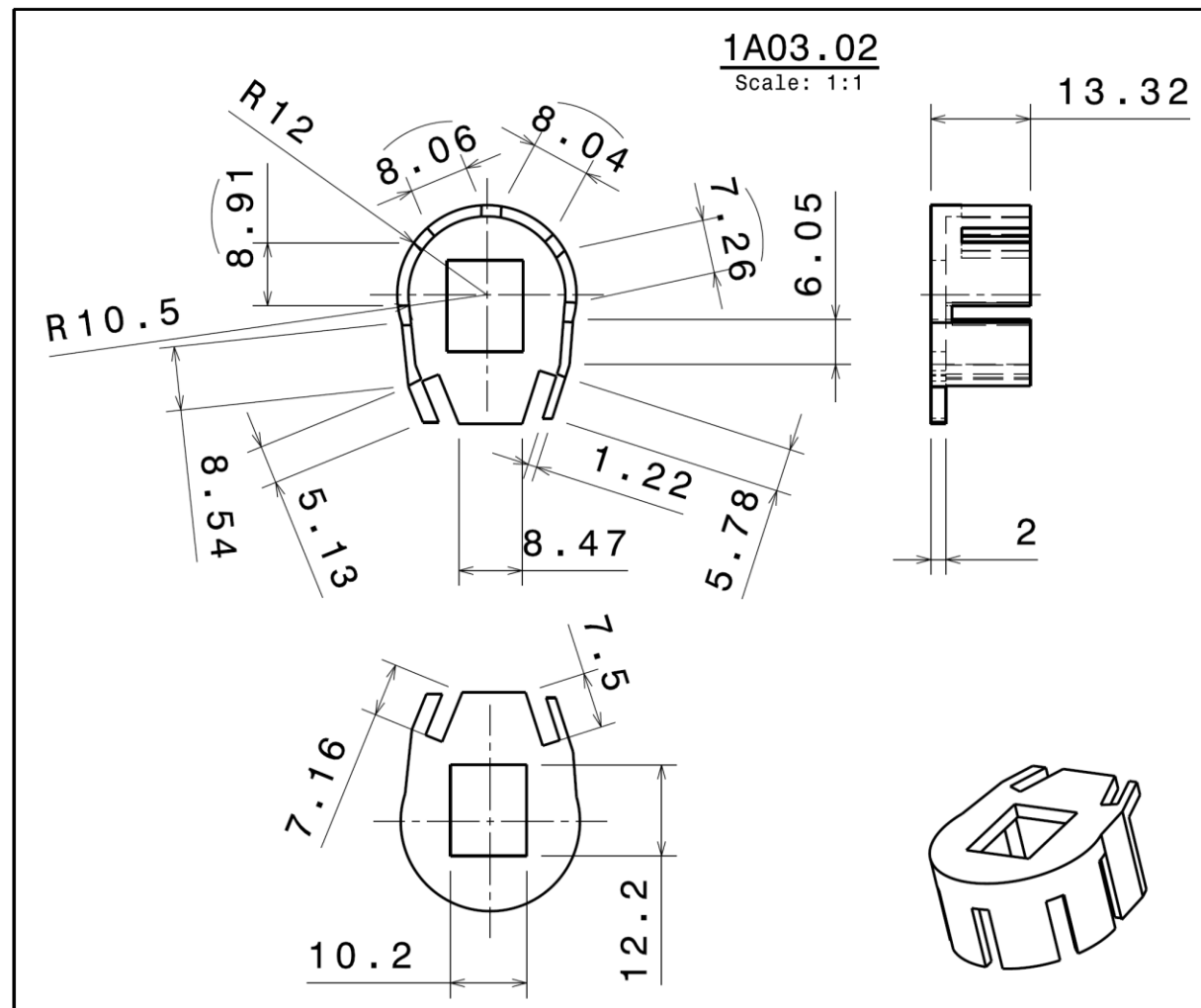
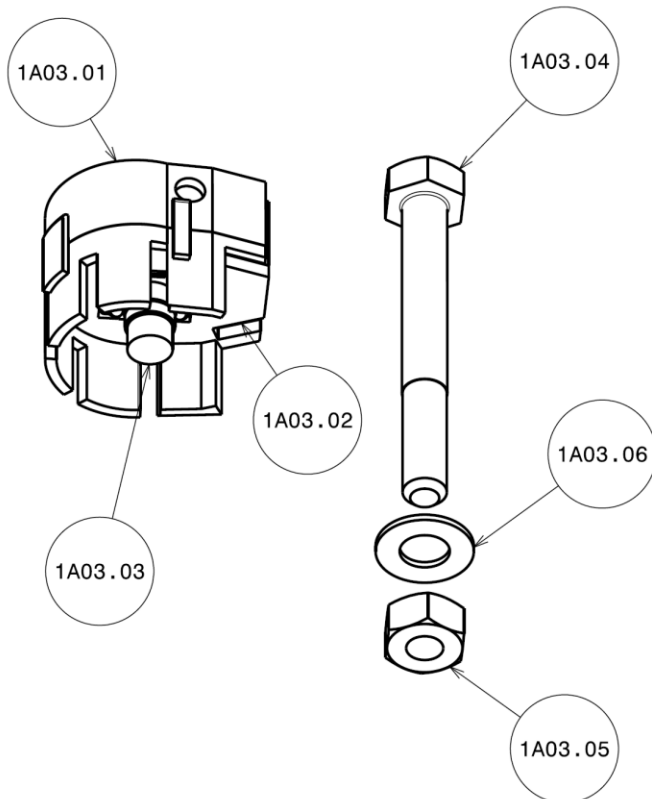
José M. Ríos Rueda

DEPARTAMENTO

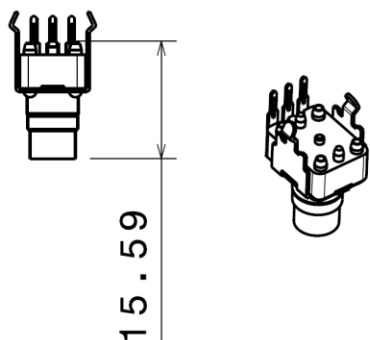
Motor/Electrónica



**ARUS**  
ANDALUCÍA RACING TEAM



**1A03.03**  
Scale: 1:1



**NOTAS:**

- El elemento 1A03.03 se corresponde con el potenciómetro de ALPS RK09D113000F, por lo que cualquier información se podrá consultar en su datasheet. Solo requiere una reducción de su eje tal y como se indica en el plano.
- Elemento 1A03.04: ANSI B18.2.3.5M BOLT M6x50 STEEL HEXAGON.
- Elemento 1A03.05: ANSI B18.2.4.1M NUT M6 STEEL HEXAGON STYLE.
- Elemento 1A03.06: ANSI\_B18.22M WASHER 6x13 STEEL PLAIN.

**ASSEMBLY**

**Carrier del potenciómetro**

ESCALA

**1:1**

TAMAÑO

**A4**

REFERENCIA

**1A03**

AUTOR:

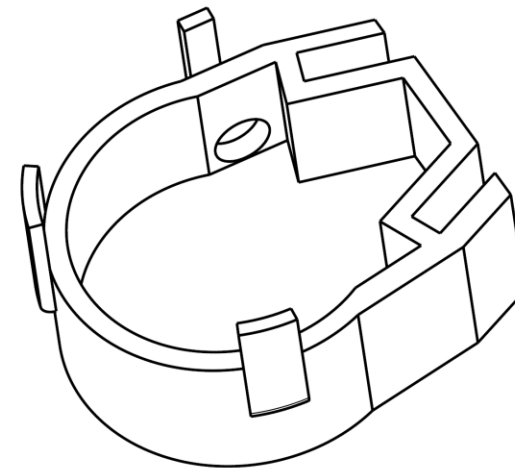
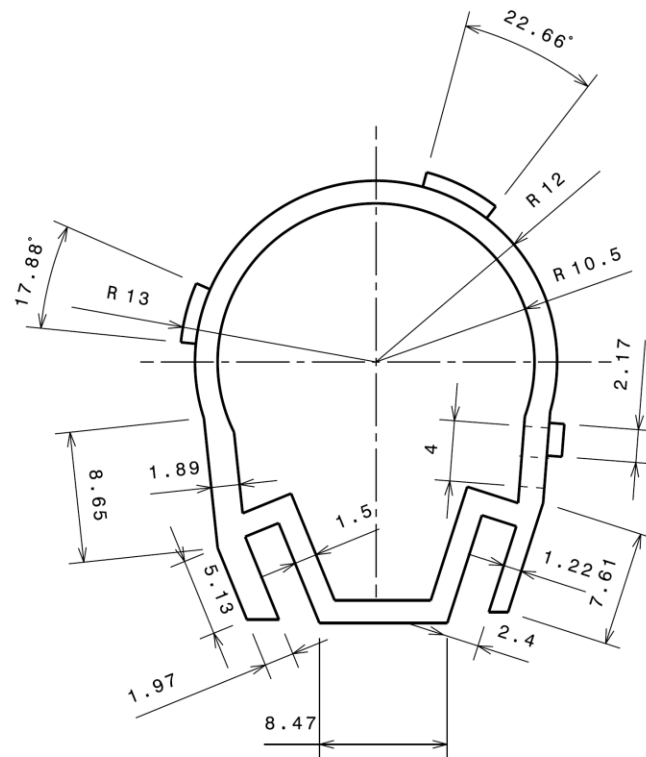
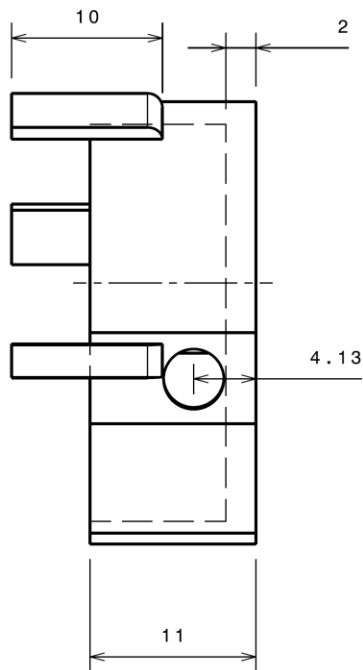
**José M. Ríos Rueda**

DEPARTAMENTO

**Motor/Electrónica**



**ARUS**  
ANDALUCÍA RACING TEAM



**Notas:**

- Los elementos serán 1A03.01 y 1A03.02 serán fabricados mediante impresión 3D.
- Aplicar pegamento de cianocrilato entre los elementos 1A03.01 y 1A03.02 una vez montado el sistema.
- Aplicar pegamento de cianocrilato entre los elementos 1A03.02 y 1A02 uniformemente a lo largo de los áletas del elemento 1A03.03 y el eje del elemento 1A02.

\*Evitar pegar parte móviles. Estas son:

- El eje del elemento 1A03.03 con él mismo.
- El eje del elemento 1A02 con él mismo.

PART Tapadera superior del carrier del potenciómetro

ESCALA

1:2

TAMAÑO

A4

REFERENCIA

1A03.01

AUTOR:

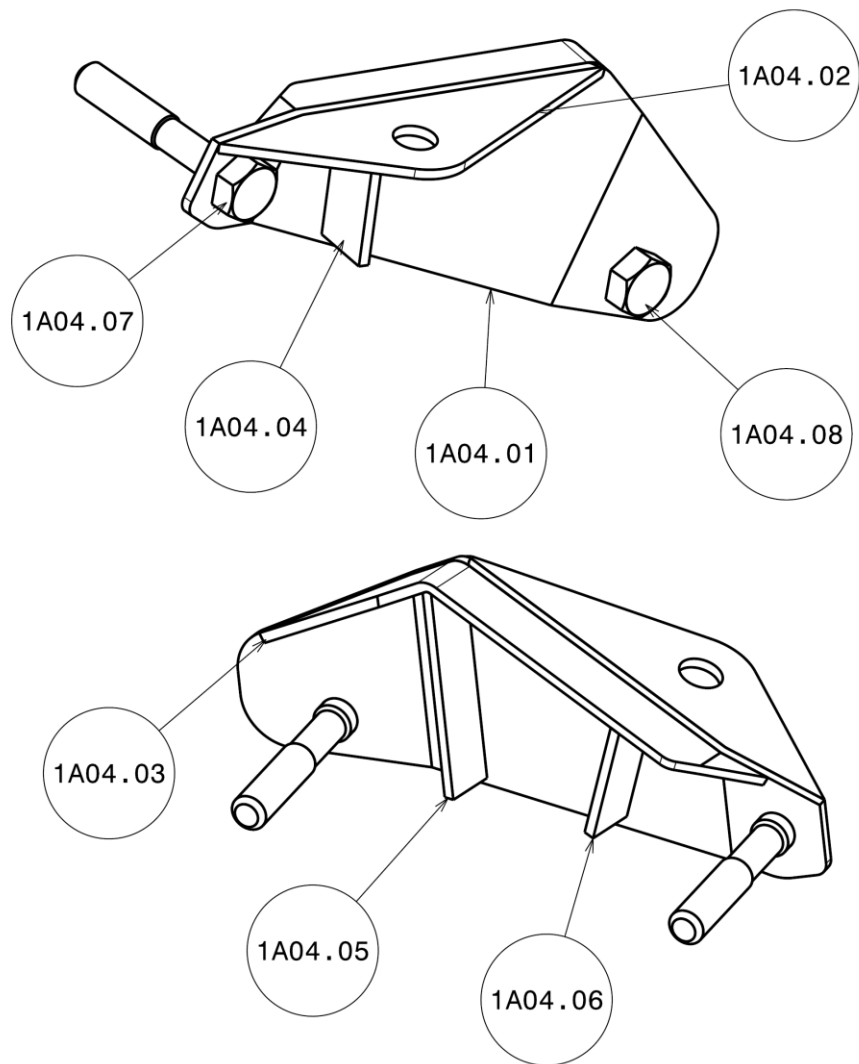
José M. Ríos Rueda

DEPARTAMENTO

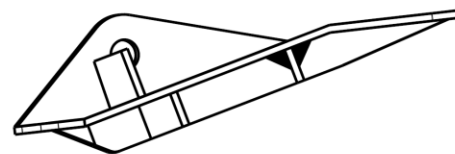
Motor/Electrónica



**ARUS**  
ANDALUCÍA RACING TEAM



Auxiliary view A  
Scale: 2:3



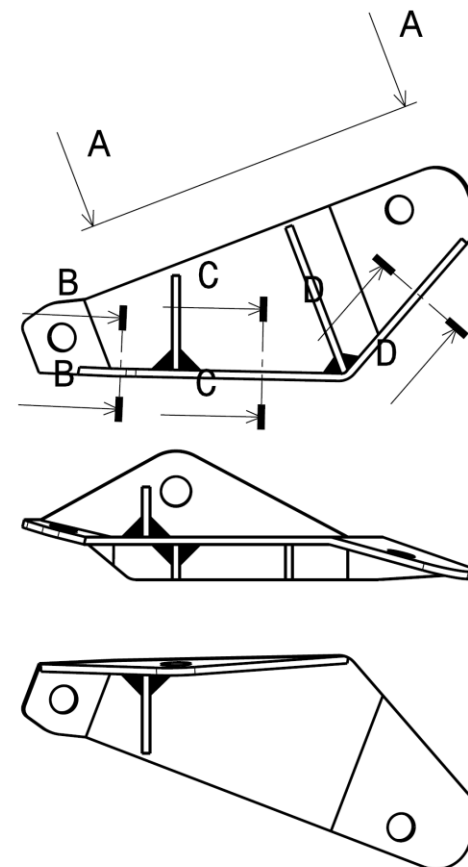
Section view D-D  
Scale: 2:3



Section view C-C  
Scale: 2:3



Section view B-B  
Scale: 2:3



**NOTAS:**

- Los elementos 1A04.08 y 1A04.07 se corresponden con dos de los "right crankcase cover bolts", los cuales son dos OEM del motor HONDA.
- Todos elementos del part 1A04 (excepto el 1A04.07 y el 1A04.08) se obtienen a partir de chapa de acero de 1.5mm de espesor.

PART:

Cogida actuador

ESCALA

1:1

TAMAÑO

A4

REFERENCIA

1A04

AUTOR:

José M. Ríos Rueda

DEPARTAMENTO

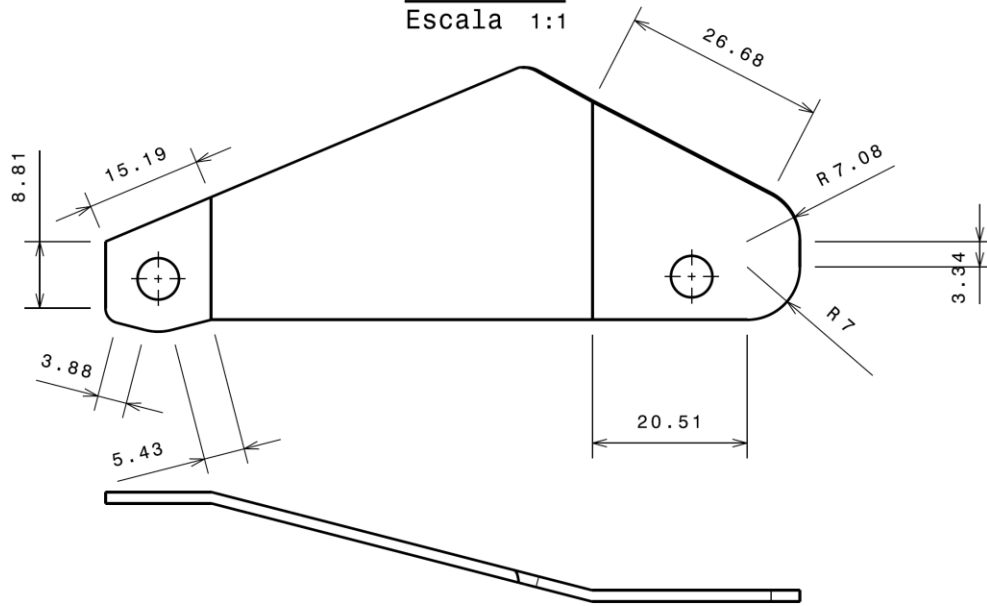
Motor/Electrónica



**ARUS**  
ANDALUCÍA RACING TEAM

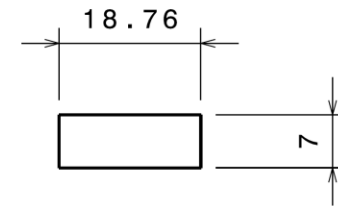
**1A04.01**

Escala 1:1



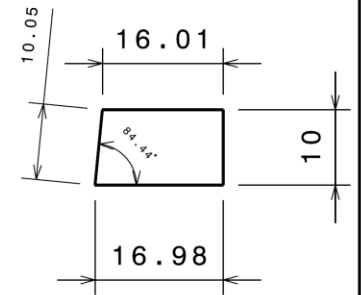
**1A04.06**

Escala: 1:1



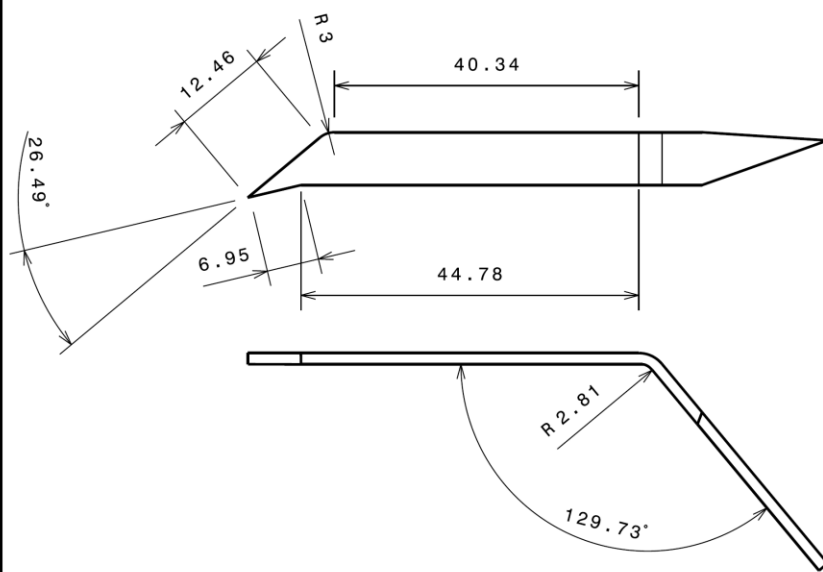
**1A04.04**

Escala: 1:1



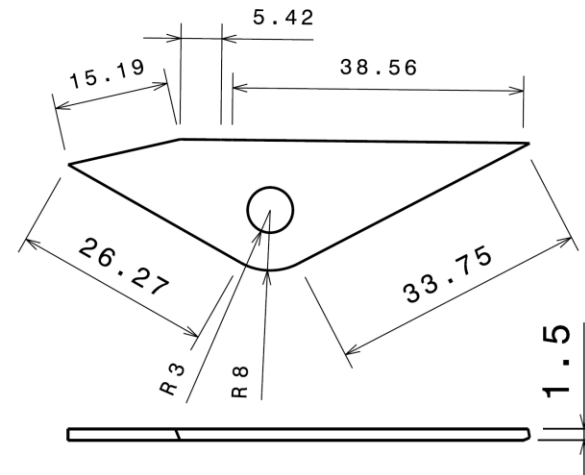
**1A04.03**

Escale: 1:1



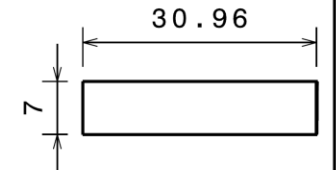
**1A04.02**

Escala: 1:1



**1A04.05**

Escala: 1:1



PART

Cogida actuador

ESCALA

1:1

TAMAÑO

A4

REFERENCIA

1A04

AUTOR:

José M. Ríos Rueda

DEPARTAMENTO

Motor/Electrónica



**ARUS**  
ANDALUCIA RACING TEAM



## 9mm Size Insulated Shaft Snap-in Type RK09K/RK09D Series

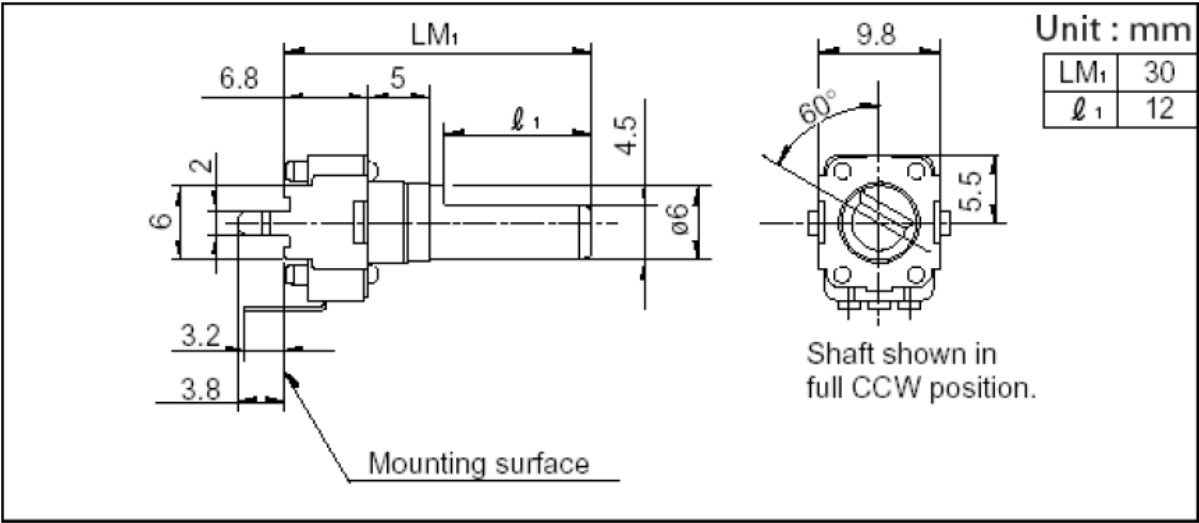
Part number		<b>RK09D113000F</b>
Number of resistor elements		Single-unit (20V DC)
Mounting direction (Mounting height)		Vertical type
Collar (Sleeve type)		With
Shaft types		Flat
Length of the shaft LM1		30mm
Center detent		With
Total resistance		10k $\Omega$
Resistance taper		1B
Operating temperature range		-10°C to +70°C
Electrical Performance	Total resistance tolerance	$\pm 20\%$
	Rated power	0.05W
	Maximum operating voltage	50V AC, 20V DC
	Insulation resistance	100M $\Omega$ min. 250V DC
	Voltage proof	250V AC for 1 minute
Mechanical Performance	Total rotational angle	300° $\pm 5^\circ$
	Rotational torque	1 to 8mN·m
	Stopper strength	0.3N·m
	Push-pull strength	50N max.
	Vibration	10 to 55 to 10Hz/min., the amplitude is 1.5mm for all the frequencies, in the 3 direction of X, Y and Z and for 2 hours respectively

Durability	Operating life	5,000 cycles
Minimum order unit (pcs.)	Japan	1,000
	Export	2,000

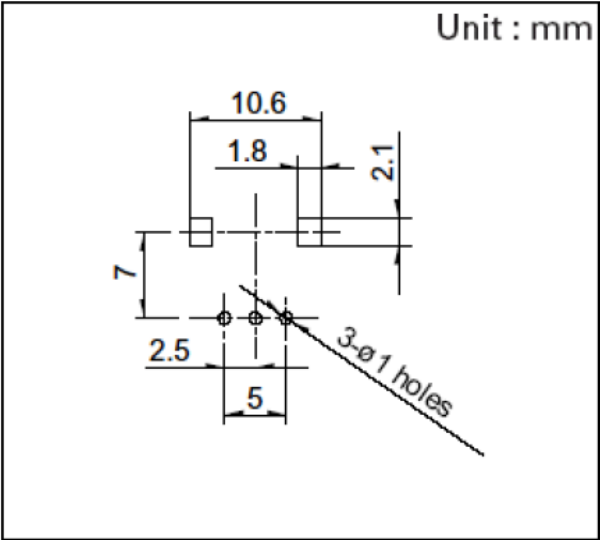
Photo



Dimensions

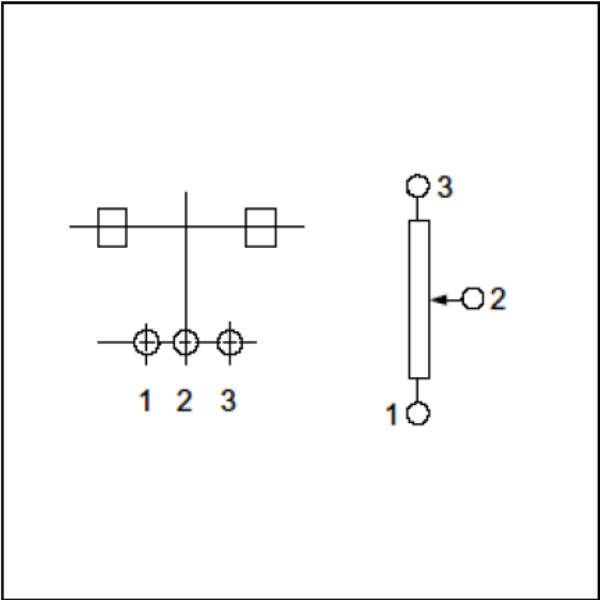


Mounting Hole Dimensions



Viewed from mounting side.

Terminal Layout / Circuit Diagram



Packing Specifications

<b>Bulk</b>	
Number of packages 1 case / Japan (pcs.)	1,000
1 case / export packing	2,000
Export package measurements (mm)	368×530×180

Soldering Conditions

<b>Reference for Hand Soldering</b>	
Tip temperature	350℃ max.
Soldering time	3s max.
No. of solders	1 time

## ABS Material Data Sheet

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.04 g/cc	0.0376 lb/in <sup>3</sup>	Grade Count = 3
Melt Flow	18 - 23 g/10 min	18 - 23 g/10 min	Average = 21.3 g/10 min; Grade Count = 3

### Mechanical Properties

Hardness, Rockwell R	103 - 112	103 - 112	Average = 110; Grade Count = 3
Tensile Strength, Yield	42.5 - 44.8 MPa	6160 - 6500 psi	Average = 44 MPa; Grade Count = 3
Elongation at Break	23 - 25 %	23 - 25 %	Average = 24.3%; Grade Count = 3
Flexural Modulus	2.25 - 2.28 GPa	326 - 331 ksi	Average = 2.3 GPa; Grade Count = 3
Flexural Yield Strength	60.6 - 73.1 MPa	8790 - 10600 psi	Average = 68.9 MPa; Grade Count = 3
Izod Impact, Notched	2.46 - 2.94 J/cm	4.61 - 5.51 ft-lb/in	Average = 2.8 J/cm; Grade Count = 3

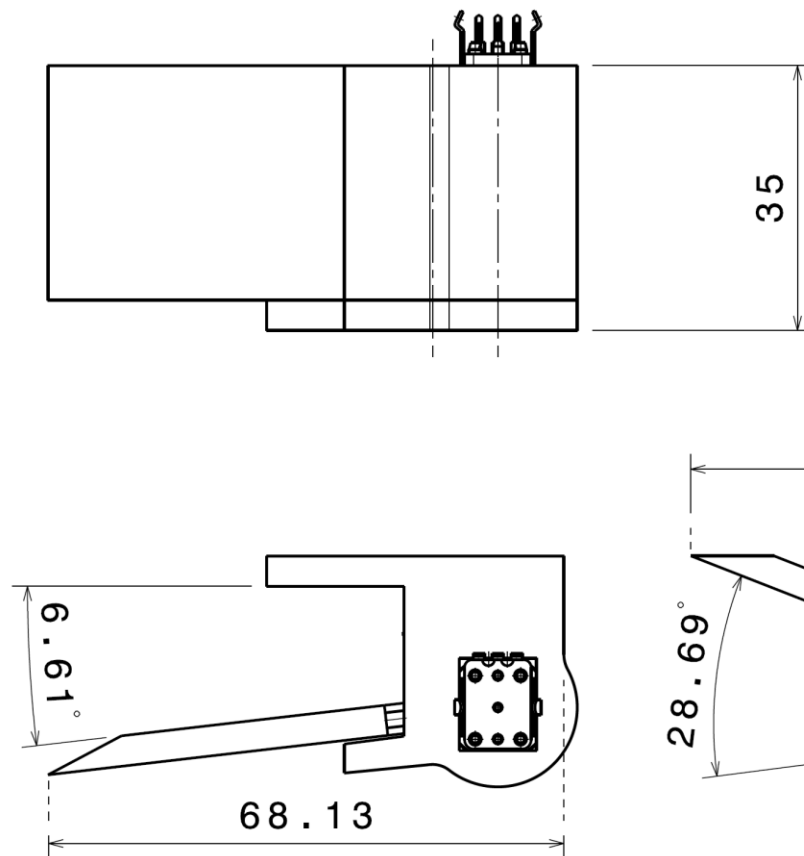
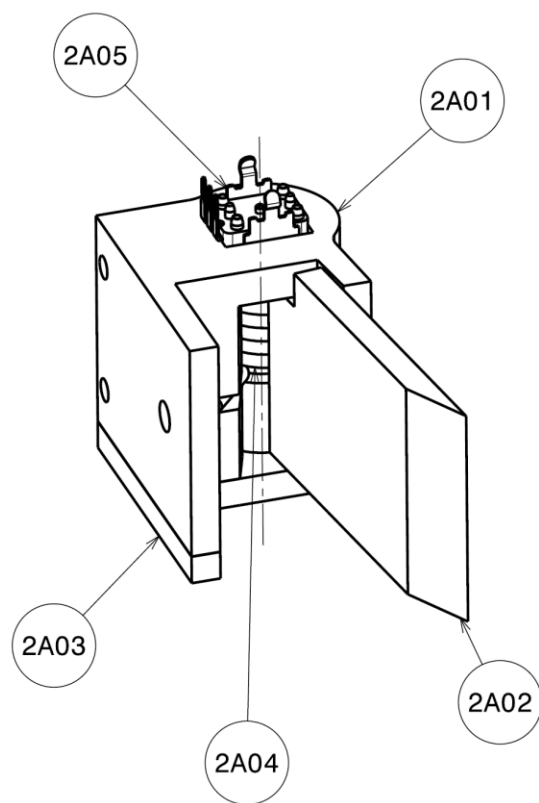
### Electrical Properties

Arc Resistance	120 sec	120 sec	Grade Count=1
Comparative Tracking Index	600 V	600 V	Grade Count=1
Hot Wire Ignition, HWI	15 sec	15 sec	Grade Count = 1
High Amp Arc Ignition, HAI	120 arcs	120 arcs	Grade Count = 1
High Voltage Arc-Tracking Rate, HVTR	25 mm/min	0.984 in/min	Grade Count = 1

### Thermal Properties

Maximum Service Temperature, Air	88 - 89 °C	190 - 192 °F	Average = 88.7°C; Grade Count = 3
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	88 - 89 °C	190 - 192 °F	Average = 88.7°C; Grade Count=3
Vicat Softening Point	100 °C	212 °F	Grade Count = 1
Flammability, UL94	HB	HB	Grade Count = 3

---



#### NOTAS:

- El elemento 2A04 se corresponde con el muelle de torsión de Muelle Stock, por lo que toda la información referente a él se cuenta en su datasheet.
- El elemento 2A05 se corresponde con el potenciómetro RK09D113000F de Alps, por lo que toda la información referente a él se cuenta en su datasheet.

ASSEMBLY

### LEVA EMBRAGUE

ESCALA

1:1

TAMAÑO

A4

REFERENCIA

2A

AUTOR:

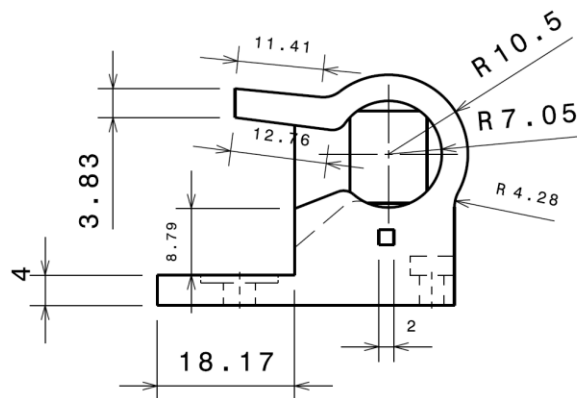
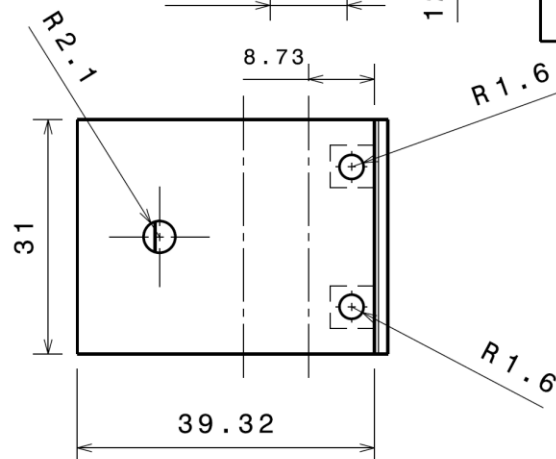
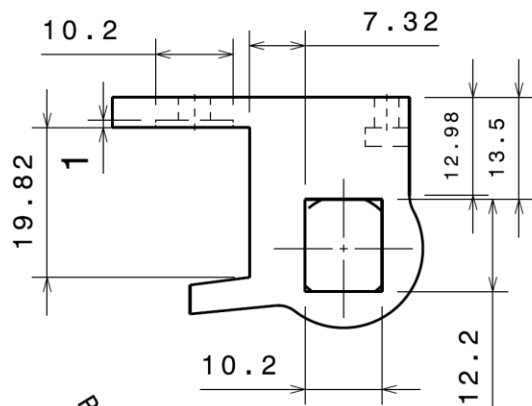
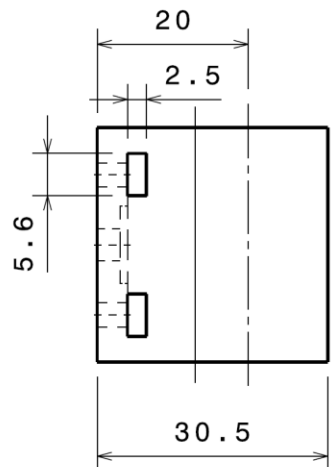
José M. Ríos Rueda

DEPARTAMENTO

Motor/Electrónica

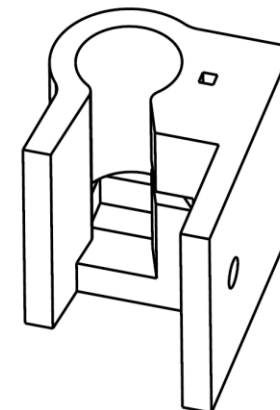
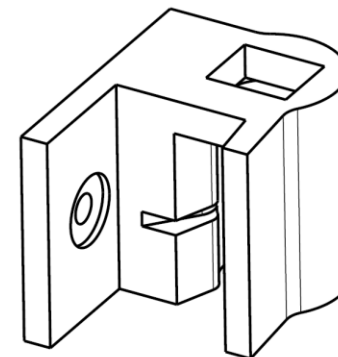
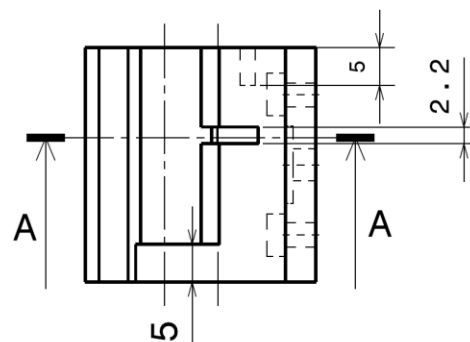
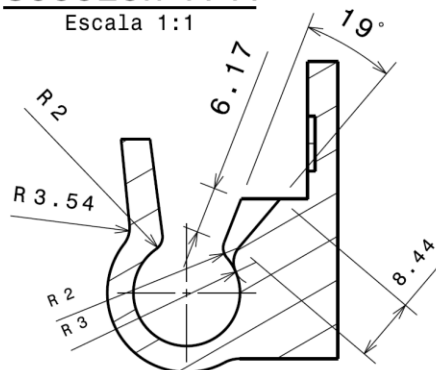



**ARUS**  
ANDALUCÍA RACING TEAM

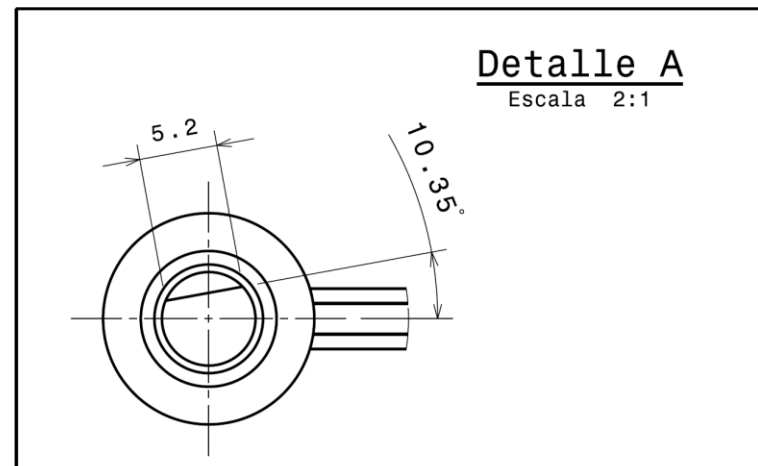
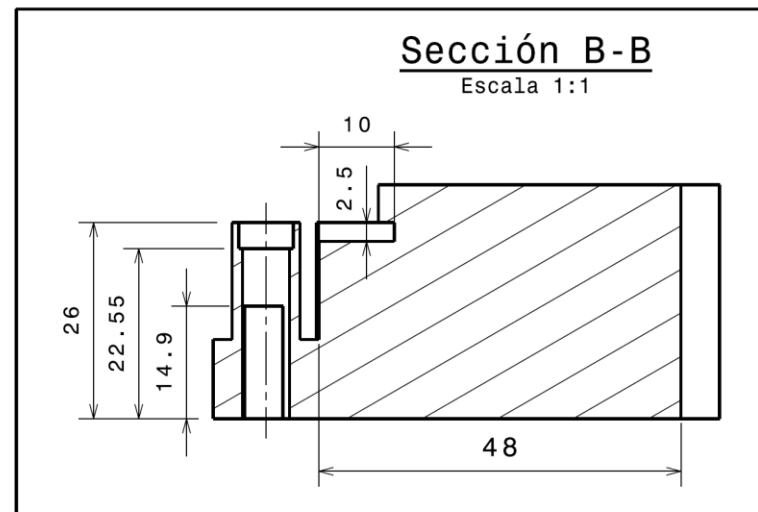
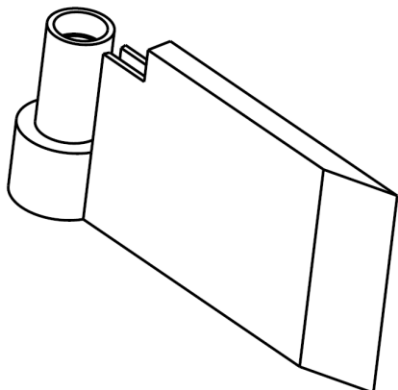
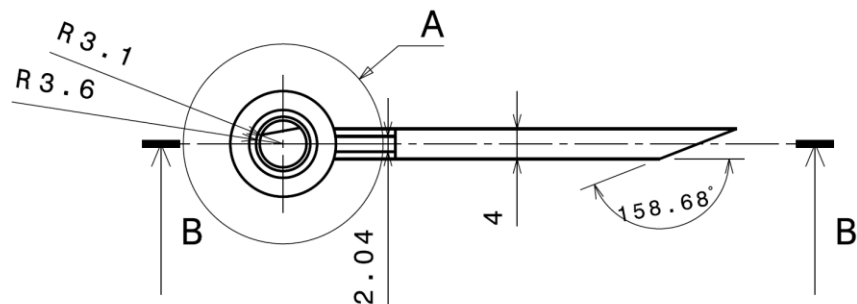
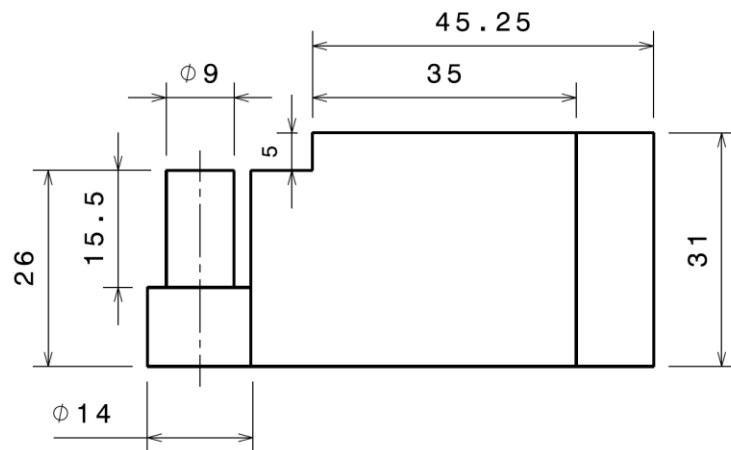



### Sección A-A

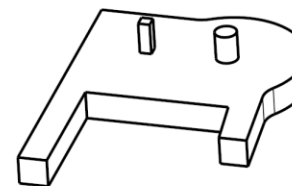
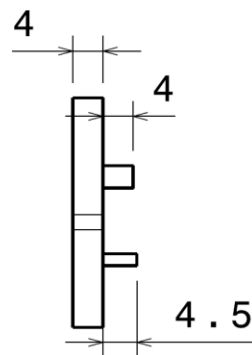
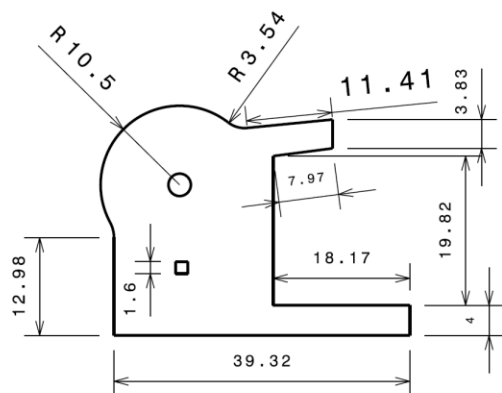
Escala 1:1



PART			 <b>ARUS</b> ANDALUCÍA RACING TEAM
Soporte leva embrague			
ESCALA 1:1	TAMAÑO A4	REFERENCIA 2A01	
AUTOR: José M. Ríos Rueda		DEPARTAMENTO Motor/Electrónica	




ASSEMBLY			 <b>ARUS</b> ANDALUCÍA RACING TEAM
Brazo leva			
ESCALA 1:1	TAMAÑO A4	REFERENCIA 2A02	
AUTOR: José M. Ríos Rueda		DEPARTAMENTO Motor/Electrónica	



**Notas:**

- En el montaje del elemento 2A03 es necesario el empleo de adhesivo de cianocrilato entre este y el elemento 2A01.

PART			 <b>ARUS</b> ANDALUCÍA RACING TEAM
Tapadera inferior			
ESCALA 1:1	TAMAÑO A4	REFERENCIA 2A03	
AUTOR: José M. Ríos Rueda		DEPARTAMENTO Motor/Electrónica	



## Ingeo Biopolymer 3D850 Technical Data Sheet

### 3D Printing Monofilament – High Heat Grade

#### Monofilament Applications

Ingeo™ 3D850 is a grade developed for manufacturing 3D printer monofilament. This grade exhibits faster crystallization rates and is able to develop improved heat-resistance in 3D printed parts. This low color resin grade demonstrates the best performance in formulated systems designed to enhance toughness or heat-resistance. Monofilaments made with Ingeo 3D850 have excellent 3D printing characteristics such as precise detail, good adhesion to build plates, less warping or curling, and low odor.

#### Processing Information

Ingeo 3D850 polymer is available in pellet form. This grade can be used in crystalline engineered formulations where nucleants, modifiers, process aids, reinforcing agents, etc. are used to meet the requirements of the application. Drying prior to processing is essential. The polymer is stable in the molten state, provided that the extrusion and drying procedures are followed. Post-annealing in the range of 176-266°F (80-130°C) can be used to promote crystallization and improve the heat deflection temperature of the 3D printed part.

#### Machine Configuration

Ingeo polymers will process on conventional extruders using general purpose screws with L/D ratios from 24:1 to 30:1 and compression ratio of 2.5:1 to 3:1. Smooth barrels are recommended. Optimization to your specific equipment may require NatureWorks technical support.

#### Process Details

##### Startup and Shutdown

Ingeo 3D850 is not compatible with a wide variety of resins, and special purging sequences should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low-viscosity, general-purpose polystyrene or high MFR polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce Ingeo polymer into the extruder at the operating conditions used in Step 1.
4. Once Ingeo polymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high-viscosity polystyrene or polypropylene.

#### Typical Material Properties <sup>(1)</sup>

Physical Properties	Ingeo Resin	ASTM Method
Specific Gravity, g/cc	1.24	D792
MFR, g/10 min <sup>(2)</sup>	7-9	D1238
Relative Viscosity <sup>(3)</sup>	4.0	D5225
Peak Melt Temperature, °C	165-180	D3418
Glass Transition Temperature, °C	55-60	D3418
<b>Mechanical Properties (crystalline)<sup>(4)</sup></b>		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	7,440 (51)	D638
Tensile Elongation, %	3.31	D638
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	2.21 (118)	D256
Tensile Strength, psi (MPa)	7,290 (50)	D638
Tensile Modulus, psi (MPa)	335,790 (2315)	D638
Heat Distortion Temperature (°C) 66 psi (0.45 MPa)	80-90	E2092
Clarity	Opaque (when crystalline)	

(1) Typical properties for injection molded bars; not to be construed as specifications.

(2) 210° C/2.16 kg

(3) RV measured at 1.0 g/dL in chloroform at 30°C

(4) 3D printed part / 100% in-fill, annealed at 110°C/15 min.

#### Processing Temperature Profile <sup>(4)</sup>

Melt Temp.	410°F	210°C
Feed Throat	113°F	45°C
Feed Temp.	355°F	190°C
Compression Section	375°F	200°C
Metering Section	390°F	210°C
Adapter	390°F	210°C
Die	390°F	210°C
Screw Speed	20-150 rpm	
Filament Diameter Inspection (on-line)	Essential for quality monofilament (+/- 3% max. deviation)	
3D Printing Temp.	190-230°C	
Annealing Temp.	80-130°C	
Print Bed Temp.:	None needed. (or 50-70°C if applicable)	

(5) Starting points only, and may need to be optimized depending on your system.

## **Ingeo Biopolymer 3D850 Printing Technical Data Sheet**

### **Drying**

In-line drying is required. A moisture content of less than 0.025% (250ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Typical drying conditions are 4 hours at 175°F (80°C) or to a dew point of -30°F (-35°C), with an airflow rate greater than 0.5 cfm/lb. of resin throughput. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly reseal any unused material.

### **Food Packaging Status**

---

#### **U.S. Status**

On January 3, 2002 FCN 000178 submitted by NatureWorks LLC to FDA became effective. This effective notification is part of list currently maintained on FDA's website at

<http://www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/packagingfcs/notifications/default.htm>

This grade of Ingeo biopolymer may therefore be used in food packaging materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal, Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced Ingeo biopolymer formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions. We urge all of our customers to perform GMP (Good Manufacturing Procedures) when constructing a package so that it is suitable for the end use.

#### **European Status**

This grade of Ingeo biopolymer complies with Plastics Regulation 10/2011 as amended. No SML's for the above referenced grade exist in Plastics Regulation 10/2011 as amended. NatureWorks LLC would like to draw your attention to the fact that the EU Plastics Regulation 10/2011, which applies to all EU Member States, includes a limit of 10 mg/dm<sup>2</sup> of the overall migration from finished plastic articles into food. In accordance with Plastics Regulation 10/2011 the migration should be measured on finished articles placed into contact with the foodstuff or appropriate food simulants for a period and at a temperature which are chosen by reference to the contact conditions in actual use, according to the rules laid down in Plastics Regulation 10/2011.

Please note that it is the responsibility of both the manufacturers of finished food contact articles as well as the industrial food packers to make sure that these articles in their actual use are in compliance with the imposed specific and overall migration requirements.

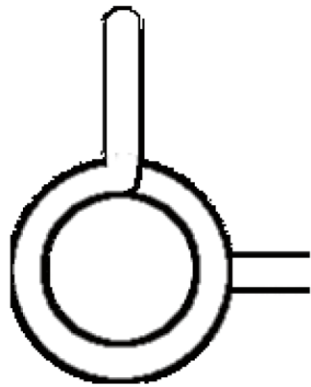
This grade as supplied meets European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste heavy metal content as described in Article 11.

Should you need further clarification, contact NatureWorks.

### **Bulk Storage Recommendations**

---

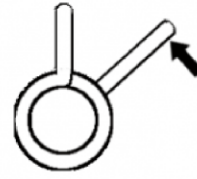
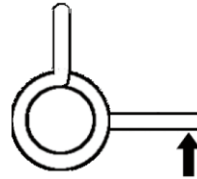
The resin silos recommended and used by NatureWorks are designed to maintain dry air in the silo and to be isolated from the outside air. This design would be in contrast to an open, vented to atmosphere system that we understand to be a typical polystyrene resin silo. Key features that are added to a typical (example: polystyrene) resin silo to achieve this objective include a cyclone and rotary valve loading system and some pressure vessel relief valves. The dry air put to the system is sized to the resin flow rate out of the silo. Not too much dry air would be needed and there may be excess instrument air (-30°F dew point) available in the plant to meet the needs for dry air. Our estimate is 10 scfm for a 20,000 lb/hr rate resin usage. Typically, resin manufacturers specify aluminum or stainless steel silos for their own use and avoid epoxy-lined steel.



Carga
0

Tu Carga
0.61

Carga máx
1.05



Recorrido patas
0.00

Recorrido patas
42.15

Recorrido patas
72.51

<b>Material:</b> inox; ALAMBRE DE ACERO EN 10270- 3 "1.4310"NS (INOX-AISI 302)	
Largo:	14
Hilo:	2
Diámetro exterior:	14
Diámetro interior:	10
Pata 1:	10
Pata 2:	10
K (DaN/vuelta):	52.10

\*medidas en mm

\* Carga en (DaN)=1.02 Kg (Fuerza)



## Anexo 8: Ejemplo de código

```
#define pos_subida 135 //¡OJO! QUE EL VALOR DECIMAL DE LA POSICIÓN  
DEL POTENCIÓMETRO DISMINUYE A MEDIDA QUE ESTE EMBRAGA  
#define pos_bajada 153  
#define margen 1  
#define tiempo_antirebote 5  
  
int k, leva, actuador;  
int subir, bajar;  
int cont1 = 0;  
int cont2 = 0;  
  
// leva: es la lectura de la entrada de la leva mapeada del 0 al  
24  
// actuador: es la posición del actuador mapeada del 0 al 24  
// k: es una variable auxiliar para determinar si la posición del  
embrague es superior  
// o inferior a la posición de subida y de bajada, especialmente  
para bajada.  
// cont1: contador para el filtro antirrebote  
// cont2: contador para el filtro antirrebote  
  
void setup() {  
  
    pinMode(A0,INPUT); // Posición leva de embrague  
    pinMode(A1,INPUT); // Posición actuador de embrague  
    pinMode(A3,INPUT); // Leva subir  
    pinMode(A4,INPUT); // Función adicional  
    pinMode(A5,INPUT); // Leva bajar  
    pinMode(3,OUTPUT); // Embragar  
    pinMode(4,OUTPUT); // Desembragar  
    pinMode(6,OUTPUT); // Bajar  
    pinMode(7,OUTPUT); // Corte de encendido  
    pinMode(8,OUTPUT); // Subir  
    Serial.begin(9600);  
}
```

```

void loop() {

    // LECTURA Y MAPEADO DE LAS SEÑALES ANALÓGICAS //
    leva = map (analogRead(A0),427,574,0,20);
    actuador = map(analogRead(A1),192,94,0,20);

    //SEGURIDAD // DESCARTE DE POSICIONES ABSURDAS PARA LA
    POSICIÓN DE LA LEVA//
    if (leva < 0) {
        leva = 0;
    }
    if (leva > 20) {
        leva = 20;
    }

    //SEGURIDAD // BLOQUEO DEL SISTEMA EN EL CASO DE QUE EL
    ACTUADOR SE ENCUENTRE FUERA DE RANGO DE TRABAJO//
    while ((actuador < -10) || (actuador > 25)) {
        digitalWrite(3,LOW);
        digitalWrite(4,LOW);
        digitalWrite(6,LOW);
        digitalWrite(7,LOW);
        digitalWrite(8,LOW);
        actuador = map(analogRead(A1),200,140,0,20);
    }

    // SEGURIDAD // FILTROS ANTIREBOTE
    if (digitalRead(A3) == 1){
        cont1++;
        if (cont1 > tiempo_antirebote){
            subir = 1;
        }
    }

    if (digitalRead(A5) == 1){

```

```

        cont2++;
        if (cont2 > tiempo_antirebote){
            bajar = 1;
        }
    }

    // SUBIR
    if (subir==1) {
        subir = 0; // SE RESETEAN LOS CONTADORES
        cont1 = 0; // SE RESETEAN LOS CONTADORES
        digitalWrite(4,LOW); // SE DESACTIVA EL SENTIDO CONTRARIO A
        EMBRAGAR
        while (analogRead(A1) > pos_subida) {
            digitalWrite (7, HIGH); // Corte de encendido permanece a
            nivel alto durante todo el proceso
            digitalWrite(3,HIGH); // EMBRAGAR
            if (analogRead(A1) < pos_subida+28){
                digitalWrite(8,HIGH); // SUBIR (antes de que el embrague
                llegue a la posición de subida)
                k = 1; // CONTADOR QUE INDICA QUE ESTE BUCLE SE HA
                EJECUTADO Y POR TANTO NO ES NECESARIO EL DELAY
            }
        }

        digitalWrite(3,LOW); // Para de embragar
        if (k == 0){
            digitalWrite(8,HIGH);
            delay(50); // En el caso de que la posición del embrague
            fuese superior a la posición
            // de subida antes de empezar el bucle es necesario
            esperar 60ms
        }
        digitalWrite(7,LOW);
        digitalWrite(8,LOW);
    }
}

```

```

//BAJAR
if (bajar==1) {
    bajar = 0; // SE RESETEAN LOS CONTADORES
    cont2 = 0; // SE RESETEAN LOS CONTADORES
    digitalWrite(4,LOW);
    while (analogRead(A1) > pos_bajada) {
        digitalWrite(3,HIGH); // EMBRAGAR
        if (analogRead(A1) < pos_bajada+28){
            digitalWrite(6,HIGH); // BAJAR (antes de que el embrague
llegue a la posición de subida)
        }
        k = 1; // CONTADOR QUE INDICA QUE ESTE BUCLE SE HA
EJECUTADO Y POR TANTO NO ES NECESARIO EL DELAY
    }
    digitalWrite(3,LOW); // Para de embragar
    if (k == 0){
        digitalWrite(6,HIGH);
        delay(50); // En el caso de que la posición del embrague
fuese superior a la posición
        // de subida antes de empezar el bucle es necesario
esperar 60ms
    }
    digitalWrite(6,LOW);
}

// SEGUIR LEVA
k = 0;

if (actuador-leva<margen && actuador-leva>-margen) {
    digitalWrite(3,LOW);
    digitalWrite(4,LOW);
}
else if (actuador > leva) {
    digitalWrite(3,LOW);
    digitalWrite(4,HIGH);
}
else if (actuador < leva) {

```



```
        digitalWrite(4,LOW);  
        digitalWrite(3,HIGH);  
    }  
}
```

## Anexo 9: Código de simulación del proceso de embrague

### Anexo 9.1: Código principal

```
clc, clear all
%% DATOS PREVIOS %%

alpha_embragado = 20; % ° % ansgulo girado de lifter lever hasta embragar
alpha_limite = 24; % ° % angulo girado de lifter hasta el final del mecanismo
R_cilindro = 0.006; % m % Radio inferior del lifter lever

Lo = 45.2; % mm % Longitud inicial de muelles

% x = R*sin(alpha)%
DX_alpha20 = R_cilindro*sin(alpha_embragado*pi/180); % mm % Longitud que se
acorta el muelle en la posición de embragada
DX_alpha24 = R_cilindro*sin(alpha_limite*pi/180); % mm % Longitud que se
acorta el muelle en la posición final

kilos_alpha0 = 20; % kg % VALORES DINAMÓMETRO
kilos_alpha24 = 23; % kg % VALORES DINAMÓMETRO

T_alpha0 = kilos_alpha0*9.81*0.035;
T_alpha20 = kilos_alpha20*9.81*0.035;
T_alpha24 = kilos_alpha24*9.81*0.035;

b0 = [50000,0.02]; % unidades % valores iniciales para K_ y DX_precarga
respectivamente

%% SISTEMA DE ECUACIONES (SE2): Para k_elastica y DX_precarga %%
%T_alpha0/0.006 = K_elastica(DX_precarga);
%T_alpha24/0.006 = K_elastica(DX_precarga+DX_alpha24);
% SE2(1)= T_alpha0/0.006 - K_elastica(DX_precarga);
% SE2(2)= T_alpha24/0.006 - K_elastica(DX_precarga+DX_alpha24);

[SE2_sol]=fsolve(@(b)
SE2(b,T_alpha0,T_alpha20,T_alpha24,DX_alpha20,DX_alpha24,R_cilindro),b0);
SE2_sol(1) % (N/m)
SE2_sol(2) % (m)

%% SIMULACIÓN %%
% REDUCCIÓN DEL PROBLEMA AL LIFTER LEVER (GIRO) %

t0=0; % (s) % Parámetros iniciales para la simulación
ist = 0.0001; % s % Paso entre iteración e iteración
alpha = 0;
rpm= 0;
I = 0.005; % kg*m^2 % Momento de inercia según el eje del lifter lever
t = t0;

Tmin = 10000;
rpmmax = -1;
Tmed = 0;
rpmmed = 0;
while (alpha<20)
    hold on
    grid
```

```

alpha = alpha + rpm*6*(ist);

T = torque(rpm); % PAR MOTOR %

DX_kmas1 = R_cilindro*sin(alpha*pi/180);

Felastica = 5*SE2_sol(1)*(SE2_sol(2)+DX_kmas1); % FUERZA ELÁSTICA %
Telastico = Felastica*R_cilindro;

%plot(t,rpm,'-b*');
%plot(t,T,'-r*');
plot(t,alpha,'-black*');

Mresultante = T-Telastico;

rho = Mresultante/(I); % rad/s^2 % aceleración angular del lifter lever %

rpm = rpm + rho*(ist)*60/(2*pi);
if rpm > rpmmax,
    rpmmax = rpm;
end
if T < Tmin,
    Tmin = T;
end
t = t + ist;
rpmmed = rpmmed + rpm;
Tmed = Tmed + T;
end
t
Tmin
rpmmax
Tmed = Tmed/(t*10000)
rpmmed = rpmmed/(t*10000)

```

## Anexo 9.2: Función adicional: Torque

```

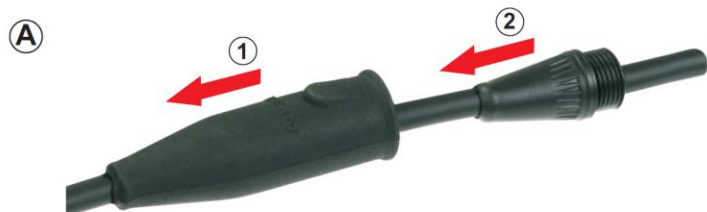
function M = torque(rpm)
%% Part No. 0 390 201 925 %% HALL, 450g, 8.2W
m = (0-22.5)/(26-0);
M = m*rpm +22.5;

if M<0
    M = 0;
end
if M>22.5
    M=22.5;
end
%% Part No. 0 390 203 309, 500g, 6W
%m = (23-0)/(0-20);
%M= m*rpm +23;
end

```

### Anexo 9.3: Función adicional: SE2

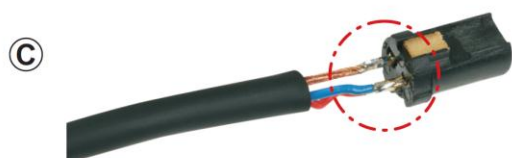
```
function [f] =  
SE2(b,T_alpha0,T_alpha20,T_alpha24,DX_alpha20,DX_alpha24,R_cilindro)  
f(1)= T_alpha0/R_cilindro - 5*b(1)*(b(2));  
f(2)= T_alpha24/R_cilindro - 5*b(1)*(b(2)+DX_alpha24);  
end
```



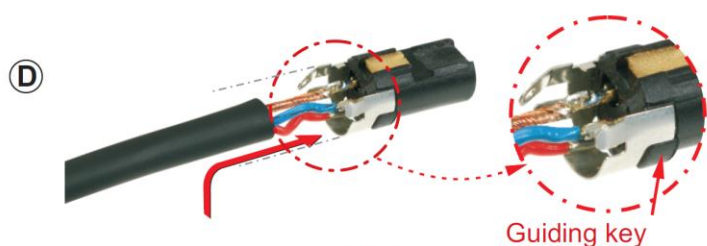
Ⓐ Slide the rubber sealing (1) (RT\*FC-B-W only) and the boot (2) onto the cable.



Ⓑ Prepare cable as shown.

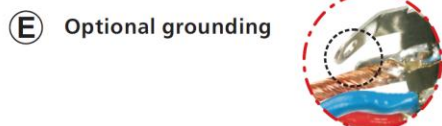


Ⓒ Insert wires into the terminals and solder them.



Ⓓ Apply the grounding to the cable and position it on the insert.  
**Attention: Pay attention to the key.**

Ⓔ Grounding Option: Ground with housing, solder #1 to the solder lug of the grounding.



Ⓕ Put chuck onto the cable.  
**Attention: Pay attention to the guiding key.**  
Black chuck: O.D. 2.0 - 3.5 mm  
Blue chuck: O.D. 3.0 - 4.5 mm

Ⓖ Slide insert and chuck together into the housing.



Ⓗ Screw the bushing onto the connector. The RT\*FC-B type is ready.



Rubber sealing assembly on page 2.

## SINGLE BAG PACKAGING:

The rubber sealing can be easily applied by hand.



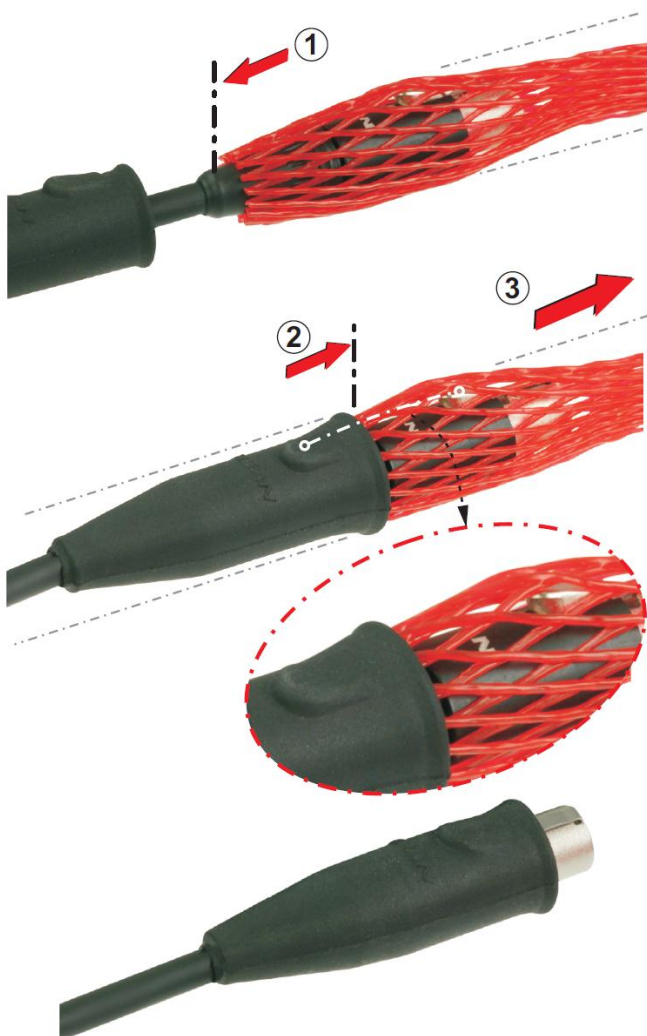
Attention: Pay attention to the position of the latch (see the picture).

► Finish



## BULK PACKAGING:

For large quantity assemblies an assembly hose is supplied with bulk packaging (-D).



① Put the assembly hose onto the connector over the end of the boot (as shown in picture).

② Push the rubber sealing onto the assembly aid.

Attention: Pay attention to the position of the latch (see the picture).

③ Hold the cable and pull the assembly tool jerkily off the connector (the sealing jacket is pulled in position).

► Finish

NEUTRIK AG LI T: +423 / 237 24 24 F: +423 / 232 53 93  
 NEUTRIK USA Inc. USA T: +1 704 / 972 3050 F: +1 704 / 438 9202  
 NEUTRIK (UK) Ltd. UK T: +44 1983 / 811 441 F: +44 1983 / 811 439  
 NEUTRIK Vertriebs GmbH DE/NL/AT/DK T: +49 8131 / 280 890 F: +49 8131 / 280 830

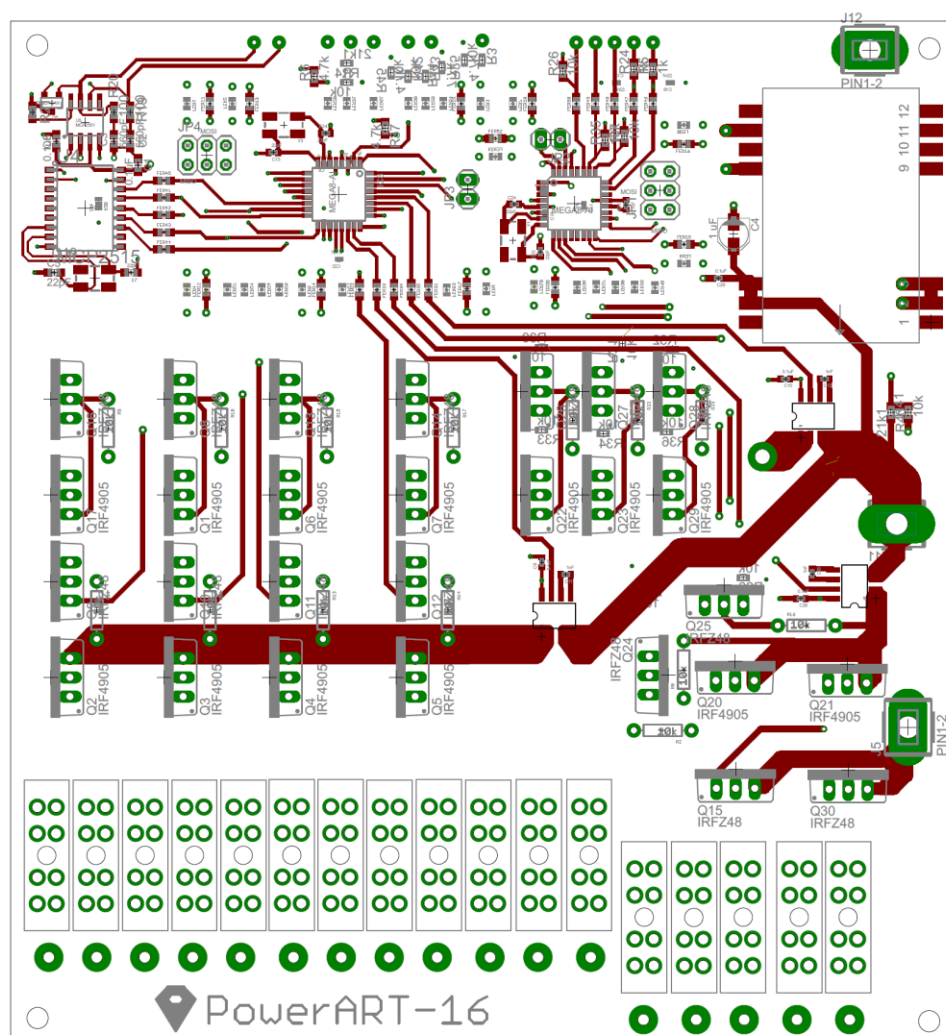
NEUTRIK France FR T: +33 1 / 4131 6750 F: +33 1 / 4131 0511  
 NEUTRIK Tokyo Ltd. JP T: +81 3 / 3663 4733 F: +81 3 / 3663 4796  
 NEUTRIK Hong Kong Ltd. HK T: +852 / 2687 6055 F: +852 / 2687 6052

Draft. Nr.: BDA 260 / 3102M1801 | Update: 08.04.2012 | Data subject to change without prior notice. © 2012 NEUTRIK®. ALL RIGHTS RESERVED.

## Anexo 11: Planos PCB

### Anexo 11.1: Capa superior

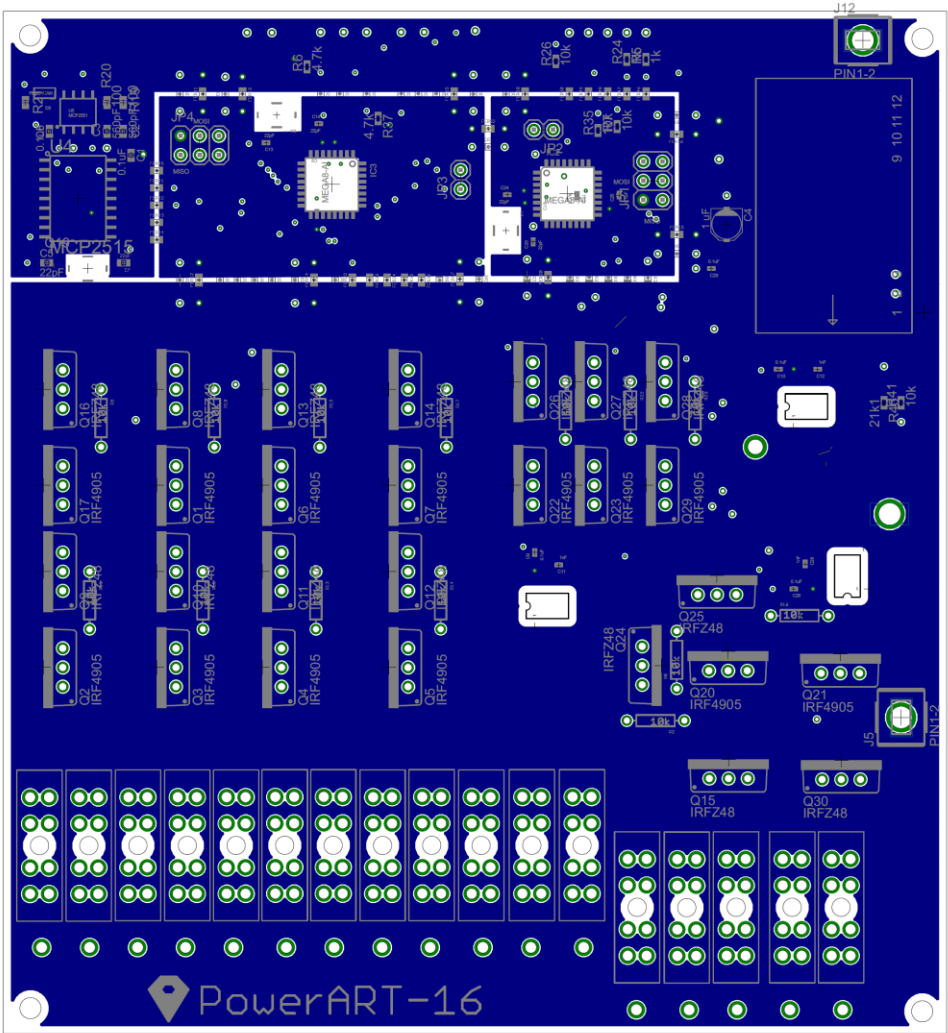
ESCALA 1:1





Anexo 11.2: Capa VCC

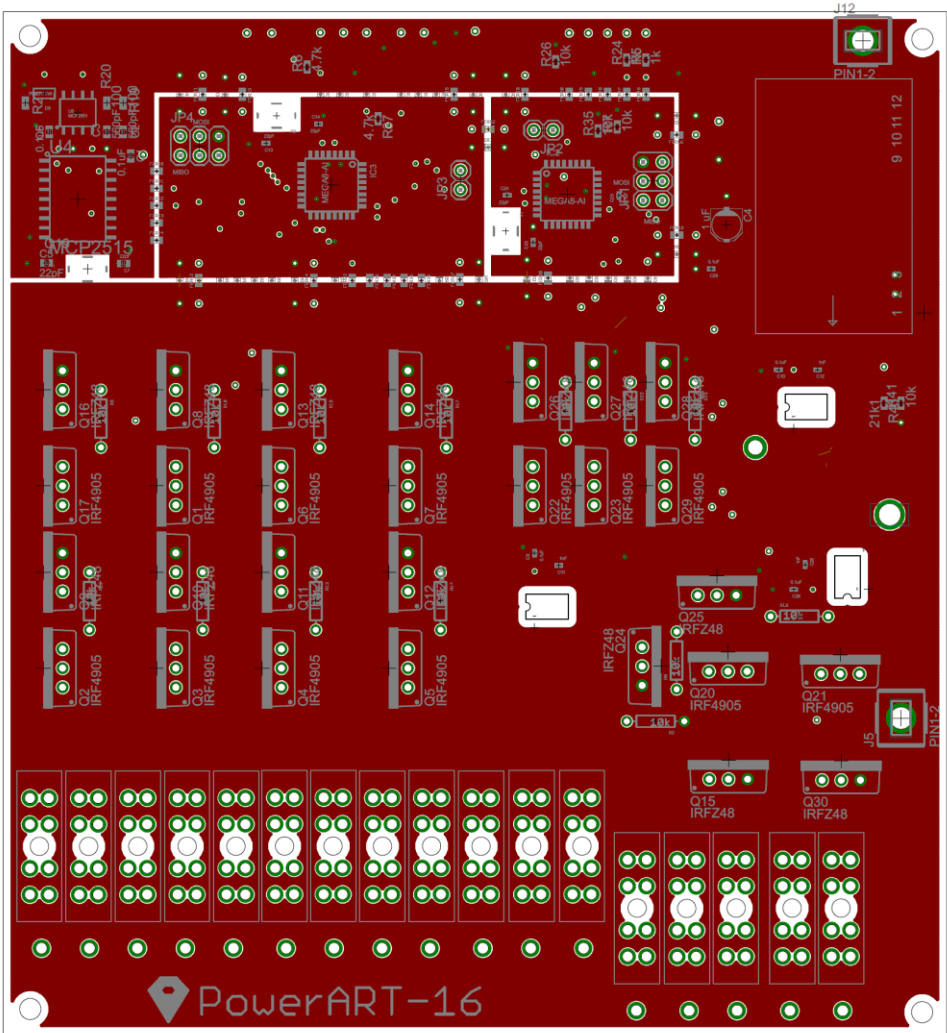
ESCALA 1:1





Anexo 11.3: Capa GND

ESCALA 1:1



Anexo 11.4: Capa inferior

ESCALA 1:1

